

L'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES EN AGRICULTURE :
IDENTIFICATION DES PRATIQUES ET DES TECHNOLOGIES PERMETTANT D'AUGMENTER LA RÉSILIENCE
DES PRODUCTIONS VÉGÉTALES DU QUÉBEC

Par
Pascal Pepin

Essai présenté au Centre universitaire de formation
en environnement et développement durable en vue
de l'obtention du grade de maîtrise en environnement (M. Env.)

Sous la direction de Michel Perron

MAÎTRISE EN ENVIRONNEMENT
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Octobre 2020

SOMMAIRE

Mots clés : agriculture, productions végétales, changements climatiques, adaptation, résilience, pratiques agricoles, technologies d'agriculture de précision

L'objectif de cet essai est d'identifier et d'analyser les opportunités opérationnelles et technologiques qui contribuent à l'adaptation aux changements climatiques du milieu agricole québécois. Les changements climatiques et les conditions météorologiques extrêmes amènent déjà leur lot de défis pour les agriculteurs et les scientifiques projettent que les perturbations climatiques s'aggraveront dans les prochaines décennies. Les producteurs agricoles devront donc gérer des risques de plus en plus imposants. Cela dit, les prévisions climatiques montrent aussi que les agriculteurs pourront profiter d'un plus grand potentiel de rendement pour certaines cultures. Pour s'adapter à cette nouvelle réalité, les agriculteurs peuvent apporter des changements à leurs pratiques qui réduiront la gravité de ces impacts. Par l'entremise d'une revue de littérature rigoureuse, le présent essai dresse un portrait de l'adaptation des productions végétales du Québec aux changements climatiques dans le but d'offrir un inventaire de mesures d'adaptation bien documentées.

Globalement, l'adaptation à la ferme repose sur quatre stratégies principales : i) se concentrer sur la santé des sols, ii) gérer plus efficacement les ressources en eau et les risques liés aux précipitations, iii) s'engager dans la lutte intégrée contre les ennemis des cultures et iv) diversifier les espèces et les variétés cultivées. Il est également primordial d'établir une stratégie globale qui implique de profiter du potentiel de synergie entre les actions visant l'adaptation aux changements climatiques et celles visant l'atténuation des gaz à effet de serre. Les pratiques de conservations du sol (culture de couverture, réduction du travail du sol, rotations diversifiées, etc.) s'avèrent être des mesures d'adaptation de type « sans regret » qui se traduisent par une grande variété d'avantages et qui comportent peu de risques financiers. En outre, les agriculteurs peuvent exploiter les différents outils technologiques pour soutenir l'adaptation des pratiques agricoles. Une analyse des technologies d'agriculture de précision, actuellement disponibles ou en développement, a permis de montrer comment elles peuvent être mises à profit en améliorant ou en facilitant l'adoption de certaines pratiques d'adaptation.

Les différents acteurs du milieu agricole pourront intégrer ces informations dans leurs prises de décision en fonction du contexte unique à chaque ferme. Le renforcement de la résilience contre les menaces liées au climat nécessite une planification et un examen minutieux des opérations agricoles et de l'ensemble de l'entreprise. L'élaboration d'un plan d'adaptation pour identifier les risques et les pratiques pour y remédier est un bon point de départ.

REMERCIEMENTS

Je tiens d’abord à remercier mon directeur Michel Perron pour son accompagnement et sa disponibilité tout au long de cette aventure. Ses conseils, sa flexibilité et sa rapidité à fournir ses rétroactions ont facilité le déroulement de cet essai.

Je souligne également la générosité de Sarah Delisle, coordonnatrice du projet Agriclimat, qui m’a accordé de son temps pour la structuration et la relecture de cet essai. Son expertise sur le sujet aura grandement bonifié le résultat.

Merci à ma chère Laurie qui m’a accompagnée tout au long de ce projet. Ta présence, ton soutien moral, ta bonne cuisine et ton sourire réconfortant ont embelli chaque journée de travail passée derrière mon écran.

Un merci spécial à mon colocataire et ami, Michaël, qui a su me mettre une saine pression tout au long de mon parcours. « Et puis, as-tu fini là ? » La répétition de cette phrase au quotidien m’aura poussé à travailler plus fort pour compléter mon essai.

Enfin, je tiens à remercier sincèrement mes parents, Marie-Claude et Gilles, et mon frère Gabriel. *Mom*, tes valeurs écologiques, tes saines habitudes de vie et ton désir inépuisable de contribuer positivement à la société sont pour moi une véritable source d’inspiration. *Dad*, merci de m’avoir transmis ta rigueur, ta rationalité et ton amour de la science. Je suis et serai toujours infiniment reconnaissant pour tout ce que vous faites pour moi.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
1. MISE EN CONTEXTE	3
1.1 Portrait de l'agriculture au Québec.....	3
1.1.1 Caractéristiques du secteur agricole et tendances importantes	4
1.1.2 Emplois, main d'œuvre et relève agricole	6
1.2 Portée de l'essai : les productions végétales	7
1.2.1 Les grandes cultures.....	7
1.2.2 Les fruits et légumes	8
2. IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR L'AGRICULTURE	10
2.1 Effets directs des changements climatiques	12
2.1.1 Températures.....	12
2.1.2 Précipitations	15
2.1.3 Dioxyde de carbone (CO ₂) atmosphérique	17
2.2 Effets indirects des changements climatiques	17
2.2.1 Insectes ravageurs.....	18
2.2.2 Maladies	19
2.2.3 Mauvaises herbes	19
2.3 Synthèse des opportunités et menaces pour l'agriculture au Québec.....	19
2.4 Impacts économiques	21
3. ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES DE L'AGRICULTURE.....	23
3.1 Cadre conceptuel des changements climatiques.....	23
3.2 Facteurs et motifs de l'adaptation	26
3.3 Catégories d'adaptation	27
3.4 Concepts clés de l'adaptation au niveau de la ferme	29
4. ADAPTATION DES PRATIQUES AGRICOLES.....	32

4.1 Pratiques de conservation des sols et mesures préventives	35
4.1.1 Cultures de couverture et engrais verts.....	36
4.1.2 Travail réduit du sol et semis direct	38
4.1.3 Réduction de la compaction du sol.....	40
4.1.4 Diversification et rotation des cultures.....	41
4.2 Agroforesterie	44
4.2.1 Haies brise-vent	45
4.2.2 Bandes riveraines élargies et agroforestières.....	47
4.3 Gestion des ennemis des cultures.....	48
4.3.1 Lutte intégrée.....	48
4.4 Gestion de l'eau.....	51
4.4.1 Irrigation et approvisionnement en eau	52
4.4.2 Ouvrages hydroagricoles et systèmes de drainage	54
4.5 Stratégies de gestion des cultures.....	56
4.5.1 Ajustement du calendrier des opérations	56
4.5.2 Cultures et variétés adaptées	57
4.6 Synthèse des pratiques d'adaptation.....	59
5. LES TECHNOLOGIES D'AGRICULTURE DE PRÉCISION AU SERVICE DE L'ADAPTATION	61
5.1 Technologies de guidage	62
5.1.1 Assistance à la conduite et autoguidage.....	62
5.1.2 Agriculture à circulation contrôlée	63
5.2 Technologies pour améliorer la lutte intégrée.....	65
5.2.1 Drones	65
5.2.2 Pièges automatisés et capteurs de spores.....	68
5.2.3 Désherbage mécanique de précision.....	69
5.3 Irrigation à taux variable	71

5.4 Application de fertilisants à taux variable	72
5.5 Synthèse des technologies d'agriculture de précision	74
CONCLUSION	76
RÉFÉRENCES	79
ANNEXE 1 – PISTES D'ADAPTATION TECHNOLOGIQUE ET APPROCHES INNOVANTES EN MATIÈRE DE GESTION DE L'EAU EN AGRICULTURE	99

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

Figure 1.1	Répartition des ventes agricoles aux autres secteurs, Québec, 2017.....	3
Figure 1.2	Évolution du nombre de fermes et de leur superficie moyenne au Québec de 1996 à 2016	4
Figure 1.3	Actif moyen par ferme selon les secteurs au Québec en 2017	5
Figure 1.4	Répartition des fermes québécoises et des revenus agricoles selon la taille en 2017	5
Figure 2.1	Portrait des changements en cours et à venir pour le territoire agricole du Québec	20
Figure 3.1	Facteurs humains et biophysiques qui déterminent la vulnérabilité ultime des systèmes agricoles aux changements climatiques	26
Figure 4.1	Variation de la teneur en carbone organique du sol au Canada en 2011	35
Figure 4.2	Pourcentage des terres cultivées selon les différentes pratiques de travail de sol au Québec de 1996 à 2016	36
Figure 4.3	Système agroforestier intégrant des haies brise-vent et bandes riveraines.....	45
Figure 4.4	Composantes de la mise en œuvre de la lutte intégrée des ennemis des cultures.....	49
Figure 4.5	Système de drainage contrôlé	56
Figure 5.1	Aperçu des technologies d'agriculture de précision	62
Figure 5.2	Exemple de carte de dépistage mettant en évidence les zones affectées par une maladie dans un champ de pommes de terre.....	66
Figure 5.3	Exemple de carte d'application d'azote à taux variable issue du modèle SCAN.....	73
Tableau 2.1	Principaux changements climatiques prévus à l'horizon 2050 en fonction des indices thermiques pour toutes les régions agricoles du Québec.....	13
Tableau 2.2	Principaux changements prévus à l'horizon 2050 en fonction des indices hydriques affectant la gestion de l'eau pour toutes les régions agricoles du Québec	16
Tableau 2.3	Synthèse des opportunités et menaces découlant des impacts des CC prévus à l'horizon 2050	20

Tableau 3.1	Caractéristiques des mesures d’adaptation	27
Tableau 3.2	Catégories des options d’adaptation aux changements climatiques en agriculture	28
Tableau 3.3	Principes de l’adaptation	31
Tableau 4.1	L’agriculture intelligente face au climat : cinq stratégies pour l’adaptation aux changements climatiques.....	32
Tableau 4.2	Cinq objectifs pour s’adapter aux changements climatiques et les pratiques d’adaptation en production végétale au Québec.....	34
Tableau 4.4	Mesures d’adaptation de type agronomique pour améliorer la gestion de l’eau au niveau de la ferme.....	53
Tableau 4.5	Synthèse des pratiques d’adaptation	59
Tableau 5.1	Synthèse du rôle des TAP dans la lutte aux changements climatiques.....	74

LISTE DES ACRONYMES, DES SYMBOLES ET DES SIGLES

AAC	Agriculture et Agroalimentaire Canada
ACC	Agriculture à circulation contrôlée
AIC	Agriculture intelligente face au climat
AP	Agriculture de précision
CC	Changements climatiques
CDAQ	Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec
CIEL	Carrefour Industriel et Expérimental de Lanaudière
CIPRA	Centre Informatique de Prévision des Ravageurs en Agriculture
CO ₂	Dioxyde de carbone
CRAAQ	Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec
CSA	<i>Climate Smart Farming</i>
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
FQPFLT	Fédération québécoise des producteurs de fruits et légumes de transformation
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GPS	<i>Global Positioning System</i>
G\$	Milliard de dollars
ha	Hectares
IRDA	Institut de recherche et de développement en agroenvironnement
ISQ	Institut de la statistique du Québec
LHE	Ligne des hautes eaux
MAPAQ	Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec
MELCC	Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
M\$	Million de dollars
ppm	Parties par million
PPRLPI	Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables
RAP	Réseau d'avertissements phytosanitaires
RNCan	Ressources naturelles Canada
SIG	Système d'information géographique
StatCan	Statistique Canada
TAP	Technologies d'agriculture de précision

UPA	Union des producteurs agricoles
UTM	Unités thermiques maïs
WAAS	<i>Wide Area Augmentation System</i>

INTRODUCTION

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) constitue la référence scientifique mondiale dans le domaine climatique. Dans son dernier rapport publié en 2014, le GIEC est catégorique : les changements climatiques (CC) sont réels et l'homme en est la première cause. Les émissions anthropiques de gaz à effet de serre (GES), qui sont dues à plusieurs facteurs comme l'utilisation de combustibles fossiles, la déforestation et même certaines pratiques agricoles, ne cessent d'augmenter en raison principalement de la croissance économique et démographique. Ces GES, dont la concentration atmosphérique a atteint des niveaux jamais vus auparavant, sont coupables du réchauffement planétaire actuel et de la variation du climat qui en découle. À ce jour, il est estimé que les activités humaines ont causé un réchauffement global d'environ 1 °C au-dessus du niveau préindustriel (1850-1900). Si la tendance se maintient, il est prévu que ce réchauffement atteigne 1,5 °C aux alentours de 2040 (GIEC, 2018). Même si les CC se manifestent différemment selon les régions du monde, ceux-ci auront inévitablement des répercussions sur plusieurs sphères de nos sociétés modernes. L'agriculture étant intrinsèquement liée au climat, elle fait partie des secteurs les plus vulnérables aux risques et aux impacts des CC (Smit et Skinner, 2002).

D'ici 2050, il est prévu que la population mondiale s'élève à près de 10 milliards d'habitants, ce qui nécessitera une augmentation de la production de la nourriture de plus de 50 % (Searchinger et al., 2019). Cette demande accrue oblige parfois les agriculteurs à adopter des pratiques agricoles qui peuvent dégrader la santé des sols et de l'environnement. Ce constat force l'humanité à repenser sa façon de produire et de consommer la nourriture. L'agriculture de demain doit donc être plus efficace, tout en allégeant son empreinte environnementale de façon drastique et en fournissant d'autres services écosystémiques comme le maintien ou la restauration de la biodiversité (Foley et al., 2011; Howden et al., 2007). Les impacts attendus des CC s'ajoutent à ce défi colossal en perturbant significativement les activités agricoles partout sur la planète.

Au Québec, les effets des CC se font déjà sentir et les agriculteurs sont soumis à de nombreux défis. Les scientifiques projettent que leurs répercussions seront de plus en plus importantes dans les prochaines décennies. Les agriculteurs ont donc intérêt à s'adapter à cette nouvelle réalité et à être proactifs pour s'assurer de maintenir la productivité de leur ferme. Pour y arriver, ils peuvent modifier leurs pratiques culturales pour atténuer les risques liés aux impacts des CC. Ils peuvent également exploiter les différents outils technologiques disponibles pour soutenir l'adaptation des pratiques agricoles. Parmi ces outils, l'utilisation des technologies d'agriculture de précision semble offrir plusieurs avantages.

Devant ce constat, l'objectif général de cet essai est d'identifier et d'analyser les opportunités opérationnelles et technologiques qui contribuent à l'adaptation aux CC du milieu agricole québécois. Plus spécifiquement, il vise à (1) définir les impacts actuels et futurs des CC sur les productions végétales du Québec, (2) identifier les pratiques agricoles les plus susceptibles d'augmenter la résilience aux CC sur les fermes du Québec et (3) élaborer une liste des différents outils technologiques disponibles pour les agriculteurs québécois et mettre en évidence les récentes innovations dans ce domaine.

L'adaptation aux CC du milieu agricole englobe divers enjeux, comme la gestion de l'eau, la gestion des ennemis des cultures, le maintien de la santé des sols et même l'efficacité énergétique. Très peu d'études regroupent toutes ces disciplines dans un même document. Par contre, depuis le début du siècle, de nombreuses études québécoises sur l'adaptation aux CC du milieu agricole ont été réalisées, ce qui a permis d'établir une base solide sur le sujet (Bryant et al., 1997; Bélanger et Bootsma, 2003; Bryant et al., 2007; Lease, Pichette et Chaumont, 2009; Ouranos, 2015; etc.). Ainsi, cette revue de littérature permet d'explorer ces différents thèmes et de synthétiser l'information disponible sur chacun d'eux. Les sources utilisées dans cet essai proviennent de banques de données fiables (*Google Scholar*, *SCOPUS*, *Agricultural and Environmental Science Database*, etc.) pour assurer que les documents utilisés soient crédibles et révisés par les pairs. Une attention particulière est portée à la date de publication des documents afin d'utiliser l'information la plus récente possible.

Afin d'atteindre les objectifs fixés, cet essai est structuré en cinq chapitres. Le premier chapitre établit un bref portrait de l'agriculture du Québec afin de mettre en lumière les différents mécanismes et enjeux qui caractérisent le secteur agricole québécois actuel. Le deuxième chapitre présente les prévisions climatiques du Québec et les opportunités et menaces qui en découlent pour le milieu agricole. Le troisième chapitre s'attarde au concept d'adaptation aux CC, et plus particulièrement aux spécificités propres à l'agriculture. Le quatrième chapitre rassemble les pratiques qui permettent aux agriculteurs d'atténuer les effets négatifs des CC et d'augmenter la résilience de leur ferme. Enfin, le chapitre cinq décrit comment certaines technologies d'agriculture de précision peuvent contribuer à l'adaptation des pratiques agricoles.

1. MISE EN CONTEXTE

Ce chapitre dresse d’abord un portrait général de l’agriculture au Québec afin de faire ressortir les différents mécanismes et enjeux propres à ce secteur (section 1.1). Ensuite, la section 1.2 définit la portée de l’essai, soit les principales productions végétales du Québec.

1.1 Portrait de l’agriculture au Québec

L’agriculture joue un rôle substantiel dans le développement économique et social dans l’ensemble du Québec méridional, notamment dans la vallée du Saint-Laurent où les terres sont fertiles et le climat est favorable (Ouranos, 2015). On compte actuellement environ 28 000 fermes sur le territoire avec une concentration plus importante dans les régions du sud du Québec. En effet, en 2016, 55 % des exploitations agricoles se trouvaient en Montérégie, en Chaudière-Appalaches et dans le Centre-du-Québec. (Charron et al., 2019b) Au total, la superficie des terres agricoles du Québec s’élevait à 3,3 millions d’hectares (ha) en 2016, dont 1,9 million était en culture (Statistique Canada, 2020a). La production animale, principalement les secteurs laitier et porcin, génère la majorité des recettes monétaires de la production agricole de la province avec plus de 60 % du total des ventes agricoles issues du marché. Ainsi, la portion restante provient des productions végétales, comme les grandes cultures (céréales, oléagineux et protéagineux) et les fruits et légumes (figure 1.1). En 2018, les recettes monétaires agricoles représentaient à elles seules 8,9 milliards de dollars (G\$), ce qui en fait la plus importante activité du secteur primaire de l’économie du Québec. (Ministère de l’Agriculture, des Pêcheries et de l’Alimentation du Québec [MAPAQ], 2018c)

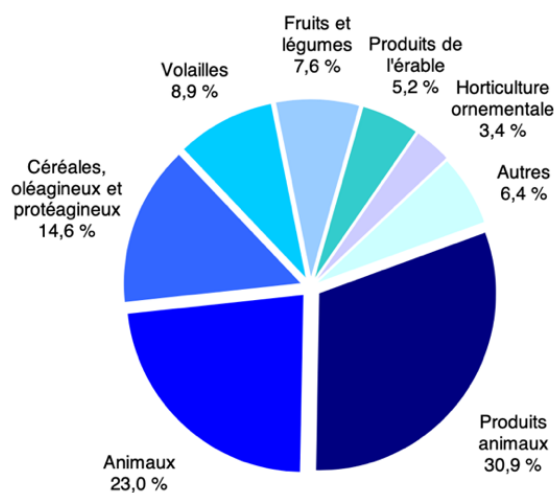


Figure 1.1 Répartition des ventes agricoles aux autres secteurs, Québec, 2017 (tiré de : Institut de la statistique du Québec [ISQ], 2019, p. 22)

1.1.1 Caractéristiques du secteur agricole et tendances importantes

La dynamique du secteur agricole québécois a beaucoup changé au fil des dernières décennies. Le nombre de fermes a diminué de 20 % entre 1996 et 2016, mais la superficie moyenne des exploitations agricoles a augmenté significativement sur cette même période (figure 1.2). On observe toutefois une stabilisation du phénomène dans la dernière décennie.

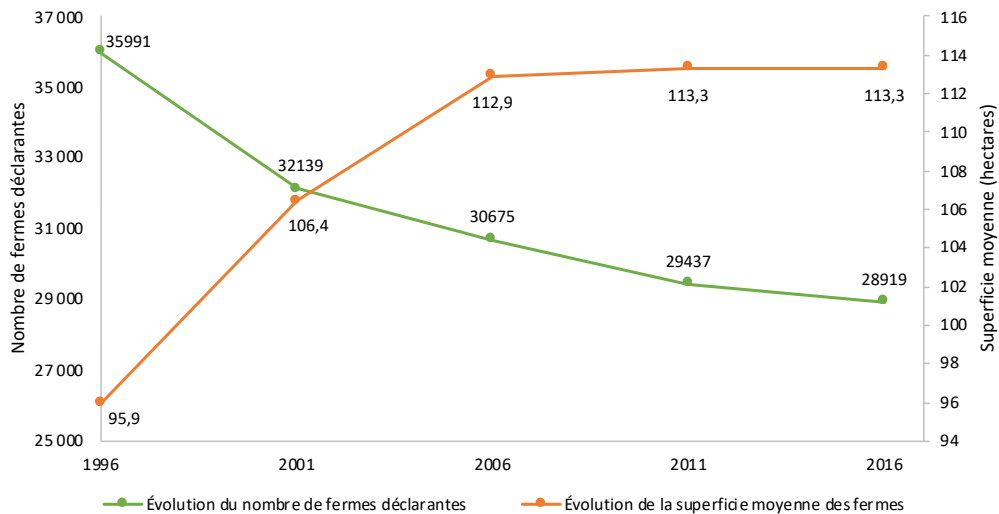


Figure 1.2 Évolution du nombre de fermes et de leur superficie moyenne au Québec de 1996 à 2016
(modifié de : Zombre, 2019; Statistique Canada, 2020; Statistique Canada, 2014)

Ces statistiques illustrent bien que les petites fermes à propriétaire unique ont progressivement évolué vers des entreprises de plus grande taille, souvent regroupées en sociétés et en corporations. Selon Statistique Canada, ce phénomène aurait été provoqué par plusieurs facteurs, comme la hausse des échanges commerciaux suscitant une concurrence plus forte, ainsi que l'adoption d'équipements technologiques augmentant la productivité. Toutefois, cette tendance ne s'est pas exprimée de façon homogène pour tous les secteurs de production. Pour certaines cultures comme le blé, le canola et le soya, le nombre de fermes et leur superficie moyenne ont augmenté considérablement entre 1996 et 2016. (Zombre, 2019; gouvernement du Canada, 2018)

Par ailleurs, la valeur du capital agricole (terres, bâtiments, machinerie, animaux) a grandement augmenté dans les deux dernières décennies. La valeur moyenne par hectare des terres agricoles est passée de 2 770 \$ en 1996 à 15 717 \$ en 2016 (dollars courants) et la valeur de l'ensemble de la machinerie agricole a doublé sur cette même période. (Zombre, 2019) Ainsi, les fermes québécoises valent maintenant près de 3 millions de dollars (M\$) en moyenne (figure 1.3), soit 53 % de plus qu'en

2011, et le taux d'endettement (passif) moyen a légèrement augmenté pour atteindre 28 % (Boudreau, 2019). Cette hausse marquée du capital agricole peut donc représenter une barrière au démarrage ou à l'expansion d'une exploitation agricole (Zombre, 2019).

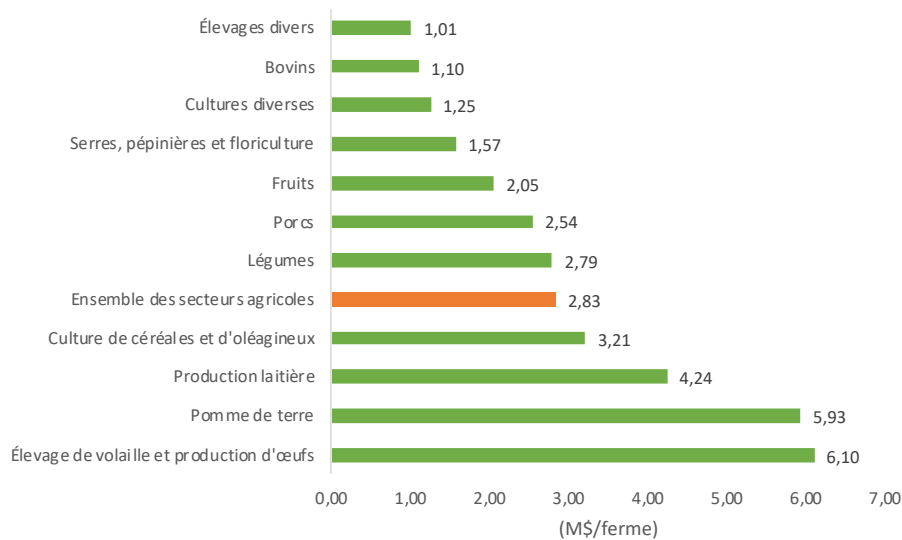


Figure 1.3 Actif moyen par ferme selon les secteurs au Québec en 2017 (tiré de : Boudreau, 2019)

Aussi, bien que les revenus bruts des exploitants agricoles aient doublé depuis 1996, le ratio de rentabilité de ceux-ci est resté plutôt stable. En effet, cela s'explique par le fait que les dépenses totales pour le fonctionnement de l'exploitation agricole ont augmenté proportionnellement aux revenus, notamment en raison de l'adoption des technologies et de la mécanisation des opérations. Ces investissements ont toutefois permis aux exploitations agricoles d'accroître leur efficacité et de réaliser des économies d'échelles. (Zombre, 2019) Malgré tout, 41 % des fermes québécoises sont considérées comme des entreprises de petite taille puisqu'elles génèrent annuellement des revenus d'exploitation de moins de 100 000 \$ (figure 1.4), ce qui sous-entend que leur capacité d'investissement est plutôt limitée.

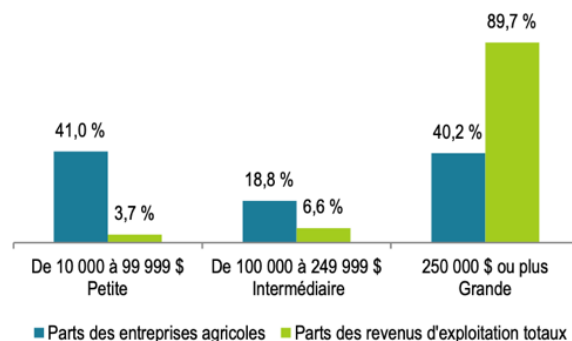


Figure 1.4 Répartition des fermes québécoises et des revenus agricoles selon la taille en 2017 (tiré de : Garneau, 2019)

Enfin, un autre élément important qui caractérise le secteur agricole québécois est l'importance des échanges commerciaux à l'international. Actuellement, seulement 42 % des ventes du secteur bioalimentaire québécois se font au Québec. La portion restante est vendue dans le reste du Canada (26 %) et à l'étranger (32 %). La valeur des exportations de produits bioalimentaires du Québec a quadruplé entre 1995 et 2018 pour atteindre plus de 8,6 G\$. (MAPAQ, 2019) Les produits bioalimentaires québécois sont exportés dans plus de 160 pays, mais les États-Unis demeurent le principal client avec plus de 68 % des exportations. Toutefois, seulement 20 % de ces ventes provenaient directement de l'agriculture (produits non transformés). En effet, le Québec mise davantage sur l'exportation de produits transformés. (Gilbert et Hitayezu, 2018; MAPAQ, 2019) Le gouvernement du Québec souhaite d'ailleurs accroître les exportations internationales pour atteindre la cible de la Politique bioalimentaire 2018-2025 qui est de porter à 14 G\$ la valeur totale des ventes internationales de produits bioalimentaires pour 2025. (MAPAQ, 2019)

1.1.2 Emplois, main d'œuvre et relève agricole

Le secteur agricole québécois est un acteur important sur le marché du travail avec plus de 70 000 emplois recensés en 2017. Toutefois, dans un contexte de pénurie de main d'œuvre locale, près de 20 % de ces emplois étaient occupés par des travailleurs étrangers temporaires. (Charron et al., 2019b) D'après un rapport du Conseil canadien pour les ressources humaines en agriculture (CCRHA) publié en 2016, le besoin de main d'œuvre diminuera d'ici 2025, mais le bassin de travailleurs agricoles diminuera plus rapidement. Le secteur agricole québécois fait donc face à une pénurie de main d'œuvre qui prend de l'ampleur et qui affecte la santé économique des agriculteurs. En effet, en 2014, les 3 300 postes non pourvus auraient occasionné des pertes de 116 M\$ à l'industrie agricole du Québec (CCRHA, 2016). De plus, même si l'emploi agricole est plutôt stable depuis 2010, il a connu une baisse importante durant les trois dernières décennies. En effet, la main d'œuvre agricole a diminué de près de 30 % depuis 1986, ce qui aurait été provoqué, entre autres, par l'utilisation d'équipement et de technologies augmentant la productivité, ainsi que par l'accaparement des terres par quelques sociétés. (Gouvernement du Canada, 2018)

Une autre tendance notable qui ressort des recensements de l'agriculture est le vieillissement de la population agricole. En effet, l'âge moyen des exploitants agricoles a passé de 45 ans en 1996 à 53 ans en 2016, ce qui correspond à une hausse de 17 % (Zombre, 2019). De son côté, la relève agricole est de plus en plus éduquée et spécialisée, avec 83 % de celle-ci qui détenait un diplôme postsecondaire en 2016 (Cantin et Robert-Lambert, 2017). Par contre, seulement 22 % des entreprises agricoles

québécoises comptaient une relève établie en 2016, toutes productions confondues. Plus de la moitié (56 %) des jeunes de la relève étaient âgés de 35 à 39 ans en 2016, ce qui témoigne d'une relève plus âgée qu'avant. (MAPAQ, 2018b)

1.2 Portée de l'essai : les productions végétales

Au Québec, les productions végétales représentent une partie importante du secteur agricole. En raison de leur exposition directe aux aléas météorologiques, ces types de productions sont parmi les plus vulnérables à la variabilité du climat et aux événements climatiques extrêmes (Ouranos, 2015). Pour cette raison, cet essai se concentre sur les principales productions végétales établies au Québec. Les productions animales et les cultures en serre ne sont donc pas spécifiquement visées par cet essai.

Les principales filières de productions végétales actuellement présentes dans la province sont les grandes cultures (céréales, oléagineux et protéagineux), les cultures maraîchères (pomme de terre et légumes), les cultures fruitières (pomiculture et petits fruits), l'acériculture et l'horticulture ornementale (gazon et produits de pépinières) (MAPAQ, 2020). Ces cultures n'ont toutefois pas toutes la même importance. Les grandes cultures, incluant les cultures fourragères, occupent environ 94 % de la superficie totale des terres cultivées. Les cultures maraîchères et fruitières représentent respectivement 3 % et 2 % de la superficie totale des terres en culture. (Statistique Canada, 2018a) Ainsi, en raison de leur importance sur le territoire québécois, cet essai porte une attention particulière à ces types de cultures. L'acériculture, l'horticulture ornementale et les autres cultures relativement moins importantes ne sont donc pas incluses dans la portée l'essai.

1.2.1 Les grandes cultures

Les grandes cultures, qui s'étendent sur plus d'un million d'hectares, dominent le paysage agricole du Québec. Les principales grandes cultures sont le maïs, le soya, les céréales (blé, avoine et orge) et le canola. Les cultures les plus importantes sont de loin le maïs et le soya; ces cultures accaparent plus des trois quarts de la superficie totale des cultures de grains. Cependant, le soya et le blé sont les deux cultures dont les superficies ont le plus augmenté dans les dernières années. Les quelque 12 500 fermes qui cultivent des grains produisent ensemble plus de 5,5 millions de tonnes de grains annuellement. Ces grains servent majoritairement à nourrir les animaux d'élevage : plus de 80 % de la production est destinée au marché de l'alimentation animale. Pour ce qui est de l'alimentation humaine, le blé est le grain le plus en demande. (MAPAQ, 2019c)

Un autre secteur important qui peut être inclus dans les grandes cultures est celui des plantes fourragères, comme le foin et le maïs d'ensilage. Ces cultures, incluant les prairies et les pâturages, occupent le premier rang en termes de superficie cultivée au Québec. Les plantes fourragères demeurent la principale source d'aliment pour le bétail, comme les vaches laitières. (Conseil québécois des plantes fourragères, 2018)

Par ailleurs, la population québécoise est de plus en plus conscientisée par rapport à l'impact environnemental des cultures, notamment concernant l'utilisation de pesticides, et la demande pour les produits issus de l'agriculture biologique et de l'utilisation raisonnée des pesticides prend de plus en plus d'ampleur. Puisque la majorité des grandes cultures sont caractérisées par des pratiques intensives et des rotations peu diversifiées (souvent maïs-soya), la pression sur les agriculteurs s'accroît pour qu'ils produisent des grains en utilisant des pratiques plus responsables. Plusieurs d'entre eux ont répondu à l'appel des consommateurs : le secteur biologique a connu une croissance significative dans les dernières années et les producteurs de grains font partie de ce mouvement. En effet, il y avait 519 entreprises agricoles produisant des céréales et oléagineux biologiques en 2018 et la superficie totale de ces cultures a atteint plus de 40 500 ha, soit 73 % de plus qu'en 2012. Or, cela représente encore seulement 4 % de la superficie totale de grains. Ce secteur a donc encore plusieurs défis à relever, comme la gestion des fertilisants, la gestion des risques pour la santé et l'environnement associés à l'utilisation de pesticides, l'amélioration de la santé des sols, la réduction des émissions de GES, ainsi que l'adaptation aux CC. (MAPAQ, 2019c)

1.2.2 Les fruits et légumes

Le climat du Québec permet aux agriculteurs de cultiver une multitude de fruits et légumes. On compte plus de 2100 fermes dans la culture de légumes de champs et plus de 2750 fermes dans la culture des arbres fruitiers et de petits fruits. Les superficies totales cultivées s'élèvent à plus de 37 400 ha pour les légumes de champs et à 42 250 ha pour les fruits. Cela représente environ 5 % des superficies totales cultivées dans la province. (Statistique Canada, 2018a)

Le secteur des légumes de champs compte plus de 70 espèces maraîchères, en plus des différentes variétés au sein d'une même espèce. Toutefois, les principaux légumes de champs cultivés au Québec sont les pommes de terre, le maïs sucré, les laitues, les pois, les haricots, les carottes, les choux, les oignons et les brocolis. (MAPAQ, 2017; MAPAQ, 2019a) La culture de légumes biologiques est aussi en

croissance puisque la demande pour ce type de production augmente rapidement. En 2017, plus de 380 entreprises maraîchères détenaient une certification biologique. (MAPAQ, 2019a)

Les cultures fruitières sont aussi plutôt diversifiées au Québec. Les principales cultures sont celles de la pomme, du raisin et des petits fruits (canneberge, fraise, framboise et bleuet). La production de fruits biologiques est également en essor au Québec. Le Conseil des appellations réservées et des termes valorisants du Québec (CARTV) affiche 424 entreprises agricoles détenant une certification biologique dans le secteur de la culture fruitière (CARTV, 2018).

2. IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR L'AGRICULTURE

L'agriculture est l'une des activités humaines qui dépendent le plus des conditions climatiques. Puisque les CC influencent progressivement les régimes de températures et de précipitations, ils auront nécessairement des impacts sur les productions agricoles, avec des effets plus marqués sur les productions végétales (Ouranos, 2015). En effet, Ray et al. (2015) estiment que le climat est responsable d'environ un tiers de la variabilité des rendements mondiaux des cultures, principalement en raison des variations de températures et de précipitations. Par conséquent, l'agriculture est fortement vulnérable face aux effets des CC et la sécurité alimentaire de millions de personnes est menacée à travers le globe (Zhao et al., 2017; Porter et al., 2014).

Ironiquement, le secteur agricole compte parmi les plus importants contributeurs aux CC à l'échelle mondiale (Searchinger et al., 2019). L'agriculture a donc un rôle important à jouer dans la réduction des émissions de GES pour limiter l'ampleur du problème. Toutefois, l'augmentation attendue de la demande alimentaire mondiale pose une pression importante sur les agriculteurs qui doivent trouver une façon d'être plus productifs tout en réduisant l'empreinte environnementale de leurs activités. Évidemment, cette situation présente des défis technologiques, sociaux et économiques majeurs qui s'ajoutent aux impacts des CC sur la productivité de l'agriculture. (Shafer et al., 2011)

Le secteur agricole québécois est responsable de près de 10 % des émissions de GES de la province selon le dernier inventaire québécois pour l'année 2017. Ces émissions proviennent surtout de la digestion des animaux (fermentation entérique), de la gestion des sols agricoles et du fumier qui produisent de grandes quantités de méthane (CH_4) et de protoxyde d'azote (N_2O), des GES dont les potentiels de réchauffement planétaire sont 28 et 265 fois plus grands que le dioxyde de carbone (CO_2) respectivement. À cela s'ajoutent les émissions liées à l'usage de la machinerie agricole qui ne sont pas comptabilisées dans l'inventaire. (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques [MELCC], 2019) Toutefois, les agriculteurs sont conscients de l'impact de leurs pratiques sur l'environnement et ils sont de plus en plus informés des perspectives de réduction de GES qui s'offrent à eux. Malgré ses efforts pour atténuer sa part des émissions de GES, le secteur agricole doit s'adapter aux impacts des CC qui sont inévitables. (Union des producteurs agricoles [UPA], 2017)

Certes, les techniques et les technologies modernes ont permis d'augmenter significativement la productivité des cultures, mais le rendement dépend toujours des bonnes conditions de pluie et de chaleur, et ce, au bon moment (Prairie Climate Centre, 2020). De ce fait, plusieurs scientifiques

s'intéressent à l'incidence des CC sur l'agriculture. Par exemple, de récentes études concluaient que certaines des plus importantes cultures au niveau mondial pourraient voir leur rendement chuter considérablement en raison de l'augmentation de la température. En effet, pour chaque degré Celsius supplémentaire de la température moyenne globale, les rendements du maïs, du blé, du riz et du soya diminueraient de 7,4 %, 6,0 %, 3,2 % et 3,1 % respectivement si aucune mesure d'adaptation ne sont mises en place (Zhao et al., 2017; Asseng et al., 2015). Bien que ces statistiques concernent les rendements globaux à l'échelle mondiale et que le Québec pourrait faire exception en raison de sa nordicité, elles mettent en lumière l'effet négatif que l'augmentation des températures peut avoir sur certaines cultures et l'importance de l'adaptation en agriculture.

Pour mettre en place des stratégies d'adaptation aux CC efficaces, il faut d'abord être outillé de prédictions climatiques fiables qui permettent d'anticiper les changements à venir. Dans cette optique, les experts de la climatologie utilisent des modèles numériques qui permettent de simuler l'évolution du système climatique et de ses composantes (Société canadienne de météorologie et d'océanographie [SCMO], 2014). Ainsi, en intégrant les différents scénarios d'émission mondiale de GES à ces modèles informatiques, il est possible de faire des projections du climat futur et de cibler les principaux changements climatiques à venir dans les prochaines décennies.

Au Québec, ce travail est effectué par l'organisme Ouranos qui est un consortium de recherche sur la climatologie régionale et l'adaptation aux CC. Ouranos soutient de nombreux projets en lien avec l'adaptation dans plusieurs secteurs de la société québécoise, dont l'agriculture. Au cours de la dernière décennie, les chercheurs d'Ouranos ont participé à de nombreux projets sur l'adaptation du secteur agricole. Par exemple, le projet Agriclimat mené par le Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec (CDAQ) en partenariat avec Ouranos et l'UPA est un bon exemple de collaboration entre différents acteurs du milieu agricole pour transposer les efforts de recherche en actions concrètes sur le terrain (Agriclimat, s. d.).

Les sections suivantes rassemblent les informations les plus récentes sur les projections du climat afin d'identifier les impacts possibles sur l'agriculture au Québec. Bien que ces sections décrivent les conséquences attendues d'après les projections des conditions climatiques pour l'horizon 2050 (intervalle 2040-2070), il est important de mentionner que certains effets des CC sont déjà observés et affectent déjà les agriculteurs québécois (Sanscartier, Hernandez et Blakime, 2018; Primeau, 2019, 28 juin).

2.1 Effets directs des changements climatiques

Les CC ont des effets directs sur les températures et sur les régimes de précipitation à travers le Québec. La concentration atmosphérique de CO₂ à la hausse a aussi des effets non négligeables sur la croissance des plantes. Cette section se concentre donc sur les changements observés et attendus des températures, des précipitations et de la teneur en CO₂, ainsi que sur les impacts de ces changements en agriculture.

2.1.1 Températures

La température est une variable déterminante en agriculture puisqu'elle influence le développement et la croissance des plantes (Lepage et al., 2012a). Les simulations climatiques développées par Ouranos montrent que la température moyenne du Québec a déjà augmenté de 1 à 3 °C depuis 1950 et qu'elle continuera d'augmenter significativement. En effet, on prévoit que les températures annuelles se réchaufferont de 2 à 4 °C pour la période 2041-2070 (horizon 2050) et de 4 à 7 °C pour la période 2071-2100 (horizon 2080). (Ouranos, 2015)

Ce réchauffement modifiera significativement les conditions de croissance des cultures. En effet, il a été démontré dans plusieurs études que des changements considérables au niveau des conditions de croissance ont déjà eu lieu depuis quelques décennies. Par exemple, une étude de Qian et al. (2012) montrait que la saison de croissance s'était allongée de 6 à 21 jours entre 1971 et 2000 et que les conditions de croissance s'étaient réchauffées (gain de 100 à 200 degrés-jours de croissance) au Canada.

Afin de rendre cette information disponible aux différents acteurs du milieu agricole et de mieux orienter les activités du secteur en fonction des changements prévus, la Commission agrométéorologie du Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ) a élaboré un outil d'aide à la décision et de sensibilisation : l'Atlas agroclimatique du Québec. Cet outil permet de visualiser les effets des CC à l'aide d'indices agroclimatiques. Pour chacun de ces indices, l'Atlas fournit des analyses en climat actuel et futur qui sont présentées sous forme de cartes pour l'ensemble du Québec. La hausse attendue des températures peut ainsi être exprimée à l'aide d'indices thermiques propres à l'agriculture, comme la durée de la saison de croissance et le cumul de chaleur. (Atlas agroclimatique du Québec, 2012)

Le tableau 2.1 résume les effets attendus des CC à l'horizon 2050 pour l'ensemble du Québec en fonction des différents indices thermiques. Évidemment, l'ampleur de ces effets varie selon les régions du Québec, mais la tendance est la même partout.

Tableau 2.1 Principaux changements climatiques prévus à l’horizon 2050 en fonction des indices thermiques pour toutes les régions agricoles du Québec (compilation d’après : Atlas agroclimatique du Québec, 2012; Lepage et al., 2012b; Ouranos, 2015; Sanscartier et al., 2018)

INDICES THERMIQUES		CHANGEMENTS À L’HORIZON 2050
Saison de croissance	Date de début et de fin de la saison de croissance	<ul style="list-style-type: none"> – Date de début de la saison de croissance plus hâtive – Date de fin de la saison de croissance plus tardive
	Longueur de la saison de croissance	<ul style="list-style-type: none"> – Allongement et réchauffement de la saison de croissance
Températures extrêmes	Fréquence de températures > 30 °C	<ul style="list-style-type: none"> – Augmentation significative du nombre de jours où la température sera supérieure à 30 °C en été dans l’ensemble du Québec agricole, mais de façon plus marquée dans le sud du Québec. – Augmentation de la fréquence, de la durée et de l’intensité des extrêmes de chaleur
	Température minimale annuelle	<ul style="list-style-type: none"> – Diminution de la fréquence, de la durée et de l’intensité des extrêmes froids
Degrés-jours	Cumul durant la saison de croissance	<ul style="list-style-type: none"> – Augmentation du nombre de degrés-jours
Unités thermiques maïs (UTM)	Date de début et de fin de cumul des UTM	<ul style="list-style-type: none"> – Date de début de cumul des UTM plus hâtive – Date de fin de cumul des UTM plus tardive
	Cumul des UTM	<ul style="list-style-type: none"> – Hausse du cumul des UTM
Risques de gel	Date du dernier gel printanier	<ul style="list-style-type: none"> – Date du dernier gel printanier plus hâtive
	Date du premier gel automnal	<ul style="list-style-type: none"> – Date du premier gel automnal plus tardive
	Longueur de la saison sans gel	<ul style="list-style-type: none"> – Allongement de la saison sans gel

Certains de ces changements pourront potentiellement être positifs pour l’agriculture. En effet, l’allongement de la saison de croissance et l’augmentation de l’accumulation de chaleur (degrés-jour et UTM) pourraient avantager certaines cultures, comme le maïs et le soya, dont le rendement est présentement limité par la température (Bootsma, Gameda, et McKenney, 2005). Par contre, à partir de 3 500 UTM, les rendements de ces cultures pourraient culminer, voir même régresser en raison de l’augmentation des risques de stress thermiques et hydriques. Il y a donc une limite de température que les cultures comme le maïs et le soya peuvent supporter, après quoi l’effet sur les rendements de celles-ci sera négatif (Schlenker, Roberts et Smith, 2009).

Aussi, cette hausse des unités thermiques de croissance pourrait permettre une expansion de la production de maïs et de soya dans des régions où il est présentement difficile de les cultiver. Cela aurait pour effet de modifier l'étendue géographique de la production agricole et des lieux propices à la croissance de certaines cultures. (Bootsma, Anderson, et Gameda, 2004; Ouranos, 2015) Par exemple, les agriculteurs du Saguenay-Lac-Saint-Jean, de l'Abitibi, ou du Bas-Saint-Laurent/Gaspésie pourront potentiellement cultiver de nouveaux hybrides à UTM plus élevés de maïs-grain et de soya et obtenir des rendements comparables à ce qui se récolte aujourd'hui dans le sud du Québec (Mimee et al., 2014; Bootsma et al., 2004). De plus, si les sols et la topographie le permettent, les agriculteurs auront la possibilité de cultiver de nouvelles variétés et de nouvelles cultures, et ce, même dans les régions agricoles nordiques.

Par ailleurs, le rendement annuel des cultures fourragères, comme la luzerne ou la fléole des prés, pourrait augmenter puisqu'il sera possible de faire une coupe additionnelle. Toutefois, leur valeur nutritive pourrait se dégrader. (Bertrand et al., 2008; Jing et al., 2013) En revanche, les cultures mieux adaptées aux climats froids, comme l'orge et le blé, ne seront pas avantagées par la saison de croissance plus longue et plus chaude. Leurs rendements pourraient même diminuer dans certains cas. (Qian et al., 2012; Bootsma et al., 2005)

Par ailleurs, il y aura aussi une augmentation du nombre de jours où la température excède 30 °C en été, ce qui accentuera les risques de stress thermiques des cultures (Atlas agroclimatique du Québec, 2012; Ouranos, 2015). Cependant, la réaction des cultures à ces épisodes de chaleur dépend fortement de l'espèce, de la variété et du stade de développement de la culture. (Ouranos, 2015)

En ce qui concerne les conditions climatiques en dehors de la saison de croissance, on peut s'attendre à ce que des températures plus élevées à l'automne retardent la date du premier gel automnal. Ces conditions seront moins propices à l'endurcissement au froid des plantes et les risques de mortalité hivernale des plantes fourragères pérennes pourraient augmenter. Similairement, l'augmentation de la fréquence des redoux hivernaux accompagnés de pluie pourrait causer une perte d'endurcissement, endommager le système racinaire et diminuer la couverture de neige isolante qui protège les plantes des températures létales. (Ouranos, 2015; Bélanger, 2016)

2.1.2 Précipitations

Les agriculteurs sont largement dépendants des précipitations et des ressources en eau pour assurer le bon développement de leurs cultures. Normalement, le bilan hydrique annuel est positif au Québec. En effet, les précipitations sous forme de pluie et de neige surpassent la quantité d'eau utilisée par les végétaux ou évaporée dans l'atmosphère par évapotranspiration. Cependant, la distribution saisonnière des précipitations et des températures occasionne des déficits hydriques pendant la saison de croissance des plantes et les CC auront pour effets d'augmenter ce phénomène (Michaud et al., 2012; Charron et al., 2019a).

Par ailleurs, les quantités de précipitations resteront relativement stables en été et à l'automne, mais elles augmenteront au printemps et de façon plus marquée en hiver (Michaud et al., 2012). Une hausse des précipitations sous forme de pluie en raison des redoux plus fréquents en hiver engendrera une diminution de l'épaisseur du couvert de neige, des épisodes de gel-dégel plus fréquents, ainsi que des conditions plus propices à la formation de glace au sol. Comme la neige sert d'isolant naturel contre le froid et le gel pour les cultures d'automne (blé, seigle, etc.) et les cultures fourragères pérennes, la diminution du couvert de neige réduira les chances de survie de ces cultures. (Ouranos, 2015)

Les prédictions climatiques indiquent aussi que les précipitations tomberont davantage sous forme de pluies orageuses intenses et localisées. On peut donc s'attendre à une intensification du cycle hydrologique, ce qui signifie que des périodes de sécheresse seront interrompues par des épisodes de pluies plus intenses (Macrae et Michaud, 2018). Cette augmentation de la fréquence des pluies extrêmes engendrera des excès d'eau qui peuvent être très dommageables pour les cultures. En effet, les fortes pluies accentuent les risques de ruissellement de surface et d'érosion des sols pouvant contaminer les eaux de surface par le transfert d'éléments nutritifs et de pesticides. Cette tendance serait d'ailleurs plus importante dans le sud du Québec où sont situées les plus importantes régions agricoles. (Ouranos, 2015; Sanscartier et al., 2018; Michaud et al., 2012) L'augmentation de l'érosion des sols par l'eau est une menace importante à l'atteinte d'une agriculture durable puisque cela engendre une réduction de la productivité, en plus d'accélérer les effets des CC par la perte de carbone organique et de nutriments stockés dans le sol (Gowda et al., 2018). L'intensification du cycle hydrologique provoquera également une augmentation du risque d'inondations, ce qui affectera grandement les agriculteurs qui cultivent en zones inondables (Macrae et Michaud, 2018; Mercier, 2019, 19 septembre).

Par ailleurs, la hausse des températures moyennes aura pour effet d'amplifier l'évapotranspiration des plantes et ainsi d'accroître les risques de déficits hydriques et de stress hydriques des plantes. De plus, l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional prédit que les CC auront pour effet d'augmenter la pression sur l'approvisionnement en eau puisque les périodes estivales de faible débit des cours d'eau (étiages d'été) seront plus longues et plus sévères (Direction de l'expertise hydrique, 2018). Cela pourrait induire des conflits entre les différents usagers de la ressource en eau puisque les besoins pour l'irrigation risquent d'augmenter également (Charron et al., 2019a).

Le tableau 2.2 résume les changements prévus à l'horizon 2050 qui auront un impact sur la gestion de l'eau dans toutes les régions agricoles du Québec.

Tableau 2.2 Principaux changements prévus à l'horizon 2050 affectant la gestion de l'eau pour toutes les régions agricoles du Québec (compilation d'après : Atlas agroclimatique du Québec, 2012; Lepage et al., 2012b; Ouranos, 2015; Sanscartier et al., 2018; CEHQ, 2013)

INDICES HYDRIQUES ET PHÉNOMÈNES HYDROLOGIQUES	CHANGEMENTS À L'HORIZON 2050
Cumul des précipitations	<ul style="list-style-type: none"> – Changement non significatif des précipitations estivales et automnales – Augmentation des précipitations au printemps et de façon plus marquée en hiver
Précipitations – évapotranspiration potentielle (P-ETP)	<ul style="list-style-type: none"> – Amplification de l'évapotranspiration des plantes due aux températures plus chaudes
Précipitations extrêmes	<ul style="list-style-type: none"> – Augmentation de la fréquence et de l'intensité des pluies orageuses
Étiages d'été	<ul style="list-style-type: none"> – Étiages d'été plus sévères et plus longs
Couverture neigeuse	<ul style="list-style-type: none"> – Diminution de l'épaisseur de la couverture neigeuse

Comparativement à d'autres régions du monde où les sécheresses deviendront réellement limitantes à toutes productions végétales ou presque, nous pouvons considérer que la situation nordique et le climat tempéré du Québec continuent de favoriser une diversité de production, voire une diversification encore plus grande. Le défi sera de conserver l'eau reçue hors des périodes de stress hydrique.

2.1.3 Dioxyde de carbone (CO₂) atmosphérique

À ce jour, la concentration de CO₂ atmosphérique a dépassé les 400 ppm (parties par million) et le GIEC anticipe que celle-ci pourrait franchir 600 ppm si rien n'est fait pour réduire drastiquement les émissions mondiales de GES (GIEC, 2018a). Chose certaine, cette hausse de la teneur en CO₂ atmosphérique influence la croissance et le développement des plantes. D'un côté, il a été démontré que l'enrichissement en CO₂ stimule la photosynthèse (effet de fertilisation) et améliore l'utilisation de l'azote et de l'eau par la plante, ce qui peut être bénéfique pour les rendements des cultures (Porter et al., 2014; Walthall et al., 2013). Toutefois, il a aussi été démontré que des concentrations plus élevées de CO₂ pouvaient affecter la qualité nutritionnelle de certaines cultures en ce qui concerne la teneur en zinc, en fer et en protéines (Myers et al., 2014; Walthall et al., 2013).

En règle générale, les plantes cultivées de type C₃ (blé, orge, soya, etc.), qui représentent 95 % des espèces de plantes dans le monde, seraient plus avantagées par l'augmentation de la concentration en CO₂ que les plantes de type C₄ comme le maïs (Walthall et al., 2013; Porter et al., 2014). Par contre, ces effets varient selon l'espèce et plusieurs autres facteurs, comme la température, les contraintes en eau et en nutriments, de même que le niveau de pollution en ozone troposphérique (Ouranos, 2015; Walthall et al., 2013). À titre d'exemple, il a été démontré que des concentrations plus élevées de CO₂ favoriseront davantage la luzerne que les autres graminées fourragères cultivées au Québec comme la fléole des prés (Piva et al., 2013; Bélanger, 2016).

De plus, les concentrations élevées de CO₂ stimulent également la croissance des mauvaises herbes (majoritairement des plantes de type C₃), ce qui pourrait exacerber les risques de pertes de rendement dus à la pression accrue de ces plantes adventices (Walthall et al., 2013).

2.2 Effets indirects des changements climatiques

Les changements au niveau des températures, des précipitations et de la concentration atmosphérique de CO₂ (section 2.1 à 2.3) sont des effets directs des CC qui ont des impacts notables sur l'agriculture. Par contre, les effets indirects qui découlent de l'évolution de ces facteurs climatiques sont également importants à considérer. Les effets indirects des CC sur l'agriculture concernent principalement les ennemis des cultures (insectes ravageurs, maladies et mauvaises herbes) qui sont très sensibles aux variations du climat et à la concentration en CO₂ atmosphérique. En effet, les CC créeront de nouvelles conditions climatiques qui seront favorables aux ennemis des cultures. Cela aura pour conséquence d'accroître la pression des espèces déjà présentes sur le territoire agricole québécois, mais aussi de

changer la répartition géographique de celles-ci. (Walthall et al., 2013; Ouranos, 2015) Bref, les risques sur le plan phytosanitaire seront vraisemblablement amplifiés par les CC et les rendements des cultures seront potentiellement affectés. Cette pression supplémentaire sur les cultures pourrait entraîner une hausse de l'utilisation de pesticides malgré les efforts qui sont mis en œuvre pour en réduire l'usage (UPA, 2017).

2.2.1 Insectes ravageurs

Les insectes sont des organismes poïkilothermes, ce qui signifie que leur température est déterminée par celle du milieu dans lequel ils vivent (Plouffe et Bourgeois, 2012). Un climat plus chaud modifiera au moins deux caractéristiques importantes des insectes ravageurs. Premièrement, l'activité métabolique d'un insecte accélère avec la température et sa consommation alimentaire augmente en conséquence. Deuxièmement, le nombre d'insectes sera modifié, car les taux de croissance des insectes varient également en fonction de la température. (Deutsch et al., 2018)

Le réchauffement anticipé des températures à l'horizon 2050 aura un effet direct sur la pression exercée par les insectes ravageurs en modifiant la distribution géographique, le nombre de générations annuelles, la survie hivernale et l'abondance des insectes ravageurs (Plouffe et Bourgeois, 2012). Par exemple, des températures plus chaudes en été seront favorables pour certaines espèces, comme la pyrale du maïs, le doryphore de la pomme de terre et le nématode à kyste du soya, puisqu'elles seront en mesure de compléter un plus grand nombre de générations par année (Gagnon et al., 2013; Mimee et al., 2014). Aussi, des hivers plus doux et une saison de croissance plus longue permettront à de nouvelles espèces de faire leur apparition sur le territoire québécois. En effet, on s'attend à ce que certains ennemis des cultures, présentement dommageables aux États-Unis, continuent à étendre leur aire de répartition vers le nord avec l'augmentation des températures, ce qui accroît les risques d'établissement de nouvelles espèces nuisibles au Québec (Ouranos, 2015; Plouffe et Bourgeois, 2012). Par ailleurs, les CC auront des conséquences sur l'efficacité des agents de lutte biologique contre les insectes ravageurs, car le synchronisme entre le cycle biologique des ravageurs et de leurs ennemis naturels pourrait être affecté (Brodeur et al., 2013). Enfin, les différentes espèces d'insectes pollinisateurs seront également affectées par les CC. Comme plusieurs cultures dépendent de ce service écosystémique, des mesures d'adaptation seront nécessaires pour pallier ce changement. (Walthall et al., 2013) Cela dit, les insectes bénéfiques pourront aussi bénéficier des conditions favorables à leur développement. Ainsi, en aménageant des espaces de biodiversité il y a une opportunité d'allier ces prédateurs à la lutte intégrée, tout comme les oiseaux insectivores.

2.2.2 Maladies

Les CC influenceront le développement et la répartition des agents pathogènes comme les champignons, les bactéries, les virus et les nématodes. En effet, les changements au niveau de la température et des précipitations (humidité) pourraient modifier le niveau de croissance, le taux de reproduction et de survie de l'espèce, la sensibilité de la plante hôte, ainsi que la distribution géographique de l'hôte ou de l'agent pathogène. Cela pourrait réduire l'efficacité des méthodes de lutte antiparasitaire actuelles. D'autres facteurs comme la teneur en CO₂ et en O₃ atmosphérique auront un effet indirect sur les agents pathogènes en modifiant la physiologie ou la morphologie des plantes hôtes. Les réponses biologiques des agents pathogènes aux CC seront très variables d'une espèce à l'autre et les impacts seront à la fois positifs et négatifs. Il est donc très difficile de généraliser l'impact des CC sur l'ensemble des maladies des cultures. (Gagnon et al., 2011; Walthall et al., 2013)

2.2.3 Mauvaises herbes

Les CC auront un effet fertilisant sur les plantes (cultures et mauvaises herbes), principalement en raison de l'augmentation de la teneur en CO₂ dans l'air (section 2.3). Cet effet fertilisant serait toutefois généralement plus important chez les plantes de type C₃ que les plantes de type C₄. En Amérique du Nord, 9 des 15 espèces de mauvaises herbes les plus dommageables en agriculture sont de type C₃. Ainsi, les cultures de type C₄, comme le maïs et le millet, seront désavantagées puisque la compétition exercée par les mauvaises herbes sera plus grande. (Plouffe et Bourgeois, 2012; Gagnon et al., 2011) De la même manière, certains herbicides pourraient être moins efficaces en raison de la croissance plus rapide du système racinaire de certaines espèces de mauvaises herbes du fait de la teneur en CO₂ plus élevée (Porter et al., 2014). Enfin, l'aire de distribution de certaines espèces de mauvaises herbes pourrait augmenter en raison du climat plus favorable, ce qui augmenterait les risques phytosanitaires associés à ces espèces (Gagnon et al., 2011).

2.3 Synthèse des opportunités et menaces pour l'agriculture au Québec

Les sections 2.1 et 2.2 décrivent les effets directs et indirects sur l'agriculture des changements prévus au niveau des températures, des précipitations et de la teneur en CO₂ atmosphérique. La figure 2.1 présente le portrait saisonnier des changements en cours et à venir pour le territoire agricole du Québec.

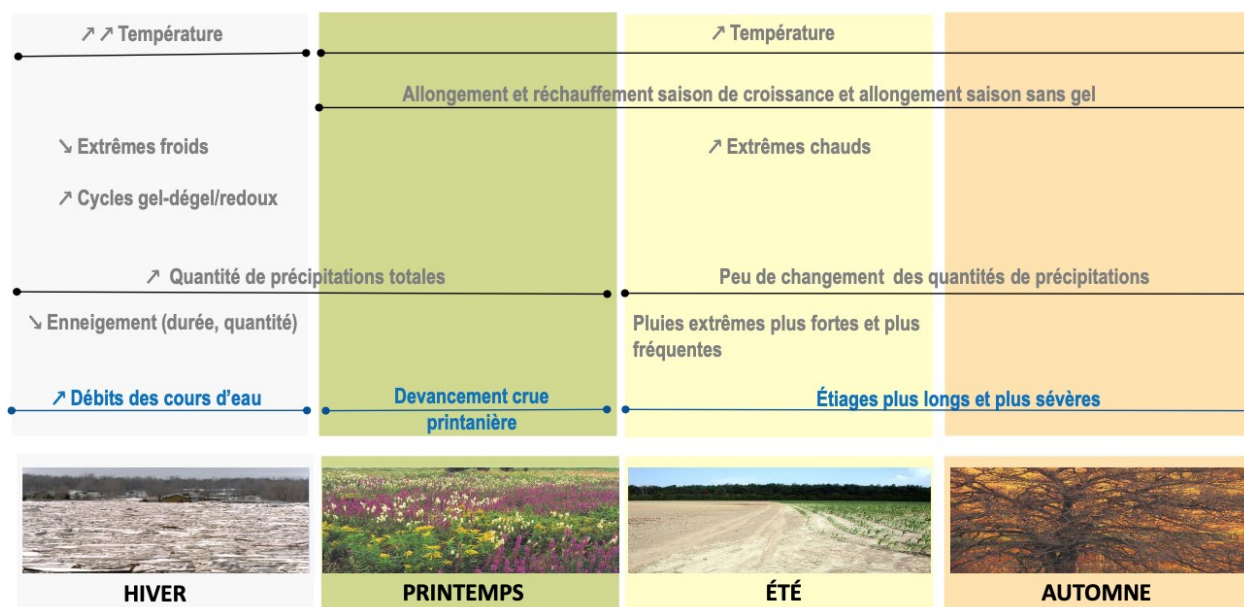


Figure 2.1 Portrait des changements en cours et à venir pour le territoire agricole du Québec (tiré de : Blondlot, 2019, p. 17)

Ces changements seront à l'origine d'opportunités et de menaces pour la production agricole au Québec (tableau 2.3).

Tableau 2.3 Synthèse des opportunités et menaces découlant des impacts des CC prévus à l'horizon 2050

	OPPORTUNITÉS	MENACES
TEMPÉRATURES	<ul style="list-style-type: none"> Amélioration des rendements potentiels de certaines cultures comme le maïs et le soya Expansion de la production de maïs et de soya dans des régions où il est présentement plus difficile de les cultiver (régions plus au nord) Possibilité d'introduire de nouvelles variétés et de nouvelles cultures, même en régions agricoles nordiques Amélioration des rendements annuels des cultures fourragères comme la luzerne et la fléole des prés en raison de la possibilité de faire une coupe additionnelle 	<ul style="list-style-type: none"> Plafonnement ou diminution des rendements de certaines cultures au-delà de 3 500 UTM en raison de l'augmentation des risques de stress thermiques Diminution possible du rendement des cultures adaptées au climat froid, comme le blé et l'orge Diminution de la valeur nutritive de certaines cultures fourragères Diminution du potentiel d'endurcissement des plantes pérennes augmentant les risques de mortalité hivernale

Tableau 2.4 Synthèse des opportunités et menaces découlant des impacts des CC prévus à l'horizon 2050 (suite)

OPPORTUNITÉS (SUITE)		MENACES (SUITE)
PRÉCIPITATIONS	Comparativement à d'autres régions du monde où les sécheresses deviendront réellement limitantes à toutes productions végétales ou presque, on peut considérer que la situation nordique et le climat tempéré du Québec continuent de favoriser une diversité de production, voire une diversification encore plus grande. Le défi sera de conserver l'eau reçue hors des périodes de stress hydrique.	<ul style="list-style-type: none"> – Augmentation des risques de dommages pour les cultures en raison des événements de pluie extrêmes plus fréquents et plus intenses (érosion des sols et inondations) – Accentuation des risques de ruissellement de surface et d'érosion des sols pouvant contaminer les eaux de surface par le transfert d'éléments nutritifs et de pesticides – Augmentation possible des conflits entre les différents usagers locaux de la ressource en eau
CO₂	Augmentation de la concentration en CO ₂ globalement bénéfique sur le rendement des cultures en ce qui concerne la stimulation de la photosynthèse et l'amélioration de l'utilisation de l'azote et de l'eau	<ul style="list-style-type: none"> – Diminution de la qualité nutritionnelle de certaines cultures – Amplification des risques de perte des récoltes à cause des mauvaises herbes
ENNEMIS DES CULTURES	Les insectes bénéfiques pourront bénéficier des conditions favorables à leur développement. Ainsi, en aménageant des espaces de biodiversité il y a une opportunité d'allier ces prédateurs à la lutte intégrée, tout comme les oiseaux insectivores.	<ul style="list-style-type: none"> – Augmentation de la pression exercée par certains ennemis des cultures déjà présents – Amplification des risques d'établissement de nouveaux ennemis des cultures – Diminution possible de l'efficacité de certaines méthodes de lutte antiparasitaire, comme la lutte biologique contre les insectes ravageurs

En somme, les agriculteurs pourront profiter d'un plus grand potentiel de rendement pour certaines cultures, mais ils devront aussi gérer des risques de plus en plus imposants. Il est donc difficile de définir avec certitude si le bilan des effets des CC sur l'agriculture sera positif ou négatif. En effet, cela dépend d'un grand nombre de facteurs, comme l'intensité et la rapidité des changements climatiques, des efforts de réductions des émissions de GES au niveau mondial et des mesures d'adaptation mises en œuvre par les agriculteurs. (Ouranos, 2015)

2.4 Impacts économiques

Les sections précédentes montrent que les agriculteurs devront gérer des risques opérationnels et financiers considérables. Il y a toutefois une incertitude dans l'estimation des enjeux économiques qui en découlent. D'un côté, il y a plusieurs avantages et opportunités qui en résultent, notamment des saisons de croissance plus longues et plus chaudes, qui permettront aux agriculteurs d'innover et d'augmenter la

rentabilité de certaines cultures. En revanche, les effets néfastes des CC, comme les événements climatiques extrêmes plus fréquents, causeront des pertes de récoltes et entraîneront des coûts de production plus élevés. Plusieurs experts ont exploré le sujet, mais il n’y a toujours pas de consensus scientifique à ce jour étant donné la complexité des mécanismes qui régissent les effets économiques des CC sur l’agriculture. En effet, il faut prendre en compte non seulement les effets directs des CC, mais aussi le niveau d’adaptation des agriculteurs, l’évolution des marchés mondiaux, etc. (Ouranos, 2015)

Par exemple, l’étude de Da Silva (2009) concluait que « globalement, le profit annuel des agriculteurs canadiens pourrait chuter de plus de 50 %. » Il précise toutefois que cette estimation est caractérisée par une variabilité importante entre les différentes provinces. Pour le Québec, l’étude conclut que les profits des agriculteurs chuteront significativement à l’horizon 2080 en raison des changements climatiques prévus.

Similairement, une étude de Debailleul et al. (2013) a analysé l’effet des CC sur la position concurrentielle du Québec en matière de production agricole pour la culture du maïs, les cultures fourragères et la pomiculture. Leur analyse suggère que les secteurs du maïs et de la pomme seront plus compétitifs grâce aux CC à l’horizon 2050. Pour le maïs, cette conclusion s’explique entre autres par le fait que les CC devraient désavantager les producteurs américains (Iowa et Illinois) et avantager les producteurs québécois. En ce qui concerne le secteur de la pomme, ce résultat serait associé à une amélioration des rendements, de plus longues saisons de croissance, une extension des superficies propices à cette culture, ainsi que des coûts de production plus bas.

Une étude semblable par Tamini et al. (2015) s’est penché sur l’incidence des CC sur la compétitivité de quelques cultures (maïs-grain, pommes et sirop d’érable). De la même façon, les auteurs concluent que « selon les scénarios de changements climatiques, la situation des producteurs québécois de maïs-grain et de pommes devrait s’améliorer, ainsi que leur position concurrentielle, du moins à la marge. »

Bref, l’évaluation des impacts économiques des CC sur le secteur agricole québécois est très complexe puisqu’elle implique une multitude de variables. On peut toutefois affirmer que l’impact sera moindre pour les fermes qui mettent en place des mesures d’adaptation (Da Silva et Belzile, 2017).

3. ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES DE L'AGRICULTURE

La compréhension scientifique des effets et des conséquences des CC s'améliore et il devient évident que les productions végétales du Québec seront affectées de plusieurs façons (chapitre 2). Cependant, chaque ferme sera affectée de manière unique et les réponses devront être personnalisées. Il est donc important que les producteurs agricoles assimilent ces informations afin de l'intégrer dans leur planification et leur prise de décision, puis de mettre en œuvre des mesures d'adaptation concrètes. À ce sujet, le projet Agriclimat a organisé plusieurs séances de sensibilisation à travers le Québec aux cours des trois dernières années afin d'informer les producteurs et autres intervenants du milieu agricole sur les changements climatiques et de favoriser l'adaptation (Agriclimat, s. d.).

L'adaptation aux CC peut aider à réduire considérablement les risques liés aux CC, à augmenter la résilience des productions agricoles face aux perturbations climatiques potentielles et même à modifier les systèmes de production pour tirer profit du climat futur (Janowiak et al., 2016). Ainsi, ce chapitre se penche sur le rôle de l'adaptation en agriculture pour répondre aux différentes menaces et opportunités associées aux CC. D'abord, la section 3.1 définit les concepts de base de la science des changements climatiques. Ensuite, la section 3.2 présente les différents motifs qui poussent les agriculteurs à s'adapter aux CC, ainsi que les facteurs qui influencent la façon dont ils s'adaptent. La section 3.3 présente les catégories pour classer et caractériser les différentes options d'adaptation en agriculture. Enfin, la section 3.4 décrit les concepts clés de l'adaptation au niveau de la ferme.

3.1 Cadre conceptuel des changements climatiques

Il est essentiel d'établir une définition claire des concepts qui sont utilisés par la communauté scientifique au sujet des CC avant d'entamer les prochains chapitres sur les mesures d'adaptation. Les principaux termes qui seront utilisés sont l'atténuation, l'adaptation, la capacité d'adaptation, la résilience et la vulnérabilité.

Atténuer les CC et s'y adapter sont les deux voies possibles pour réduire les risques. L'**atténuation** des CC signifie toute « intervention humaine visant à réduire les sources ou à renforcer les puits de gaz à effet de serre. » (GIEC, 2014) Le secteur agricole peut contribuer considérablement à l'atténuation en réduisant les émissions de GES et en séquestrant le carbone atmosphérique dans les sols. Ensuite, selon le GIEC, la définition du concept d'**adaptation** aux CC est la suivante :

« Démarche d'ajustement au climat actuel ou attendu, ainsi qu'à ses conséquences. Pour les systèmes humains¹, il s'agit d'atténuer les effets préjudiciables et d'exploiter les effets bénéfiques. Pour les systèmes naturels, l'intervention humaine peut faciliter l'adaptation au climat attendu ainsi qu'à ses conséquences. » (GIEC, 2014)

Ainsi, l'adaptation aux CC est le terme qui évoque toutes stratégies, initiatives et mesures visant spécifiquement à composer avec l'évolution du climat et les conséquences qui en découlent. Les actions d'adaptation sont généralement destinées à faire face aux plus grands risques induits par les CC, mais elles peuvent également stimuler l'innovation (Walthall et al., 2013; Janowiak et al., 2016). Pour le secteur agricole, l'adaptation aux CC se traduit par un ajustement des activités et des pratiques afin d'atténuer les incidences nuisibles des CC, mais aussi de saisir les nouvelles opportunités qui pourraient découler de l'évolution du climat (Food and Agriculture Organization [FAO], 2012; Ouranos, 2015).

Le GIEC distingue deux catégories d'adaptation, soit l'adaptation incrémentale et l'adaptation transformationnelle. La première catégorie fait référence aux « mesures d'adaptation ayant pour but le maintien de la nature et de l'intégrité d'un système ou d'un processus à une échelle donnée » (GIEC, 2014). La deuxième catégorie implique des changements radicaux et est nécessaire notamment lorsque les mesures d'adaptation incrémentale atteignent leurs limites (Ouranos, 2015). L'adaptation transformationnelle désigne donc une « adaptation qui change les aspects fondamentaux d'un système en réponse au climat et à ses effets. » (GIEC, 2014) Parmi les mesures d'adaptation incrémentale, on inclut entre autres les options d'ingénierie, les options technologiques et les options basées sur les écosystèmes (Ouranos, 2015). Les mesures d'adaptation présentées aux chapitres 4 et 5 font principalement référence à ces options d'adaptation.

Cela dit, les agriculteurs ne s'adaptent pas tous de la même façon. En effet, on distingue plusieurs types d'adaptation, soit l'adaptation anticipative, réactive, planifiée ou spontanée. Les mesures qui sont prises avant que les effets des CC ne soient constatés et qui sont axées sur le long terme font partie de l'adaptation anticipative (ou préventive). À l'inverse, celles qui sont prises après que les impacts des CC soient ressentis sont des mesures réactives et elles visent le retour aux conditions initiales lorsque cela est possible. Ces deux types de mesures d'adaptation peuvent être consciemment planifiées dans le but de faire face aux risques découlant des CC. Cependant, les mesures réactives peuvent aussi être entreprises de manière autonome ou spontanée. Dans ce cas, elles ne résultent pas d'une planification

¹ Un système agricole est un système humain puisque l'humain joue un rôle de premier plan dans le système (GIEC, 2014).

ou d'une démarche consciente en réponse aux CC. Dans la majorité des cas, l'adaptation anticipative planifiée est plus efficace que l'adaptation réactive et est plus avantageuse économiquement à long terme. Enfin, rares sont les mesures d'adaptation qui éliminent complètement les effets négatifs des CC. Des mesures d'adaptation efficaces permettent toutefois d'amoindrir la gravité des conséquences qui se produiraient sans adaptation. (GIEC, 2014; Ressources naturelles Canada [RNC], 2015; Sanscartier et al., 2018)

La **capacité d'adaptation** est définie comme la « faculté d'ajustement des systèmes, des institutions, des êtres humains et d'autres organismes, leur permettant de se prémunir contre d'éventuels dommages, de tirer parti des opportunités ou de réagir aux conséquences. » (GIEC, 2014) Dans le contexte agricole, la capacité d'adaptation réfère à la disponibilité des ressources nécessaires (infrastructures, équipements, technologies, pratiques agricoles, capacité d'investissement, etc.) et la capacité de mobiliser ces ressources pour répondre efficacement à diverses conditions difficiles (Crawford et al., 2012). Similairement, la **résilience** est « la capacité des systèmes sociaux, économiques et environnementaux à faire face à un événement dangereux ou à une tendance ou perturbation, en réagissant ou en se réorganisant de sorte à conserver leurs fonction, identité et structure fondamentales. » (GIEC, 2014)

Enfin, un autre concept important en matière d'adaptation aux CC est celui de la **vulnérabilité**. Ce terme désigne la « prédisposition à subir des dommages. La vulnérabilité englobe divers concepts ou éléments, notamment les notions de sensibilité ou de fragilité et l'incapacité de faire face et de s'adapter. » (GIEC, 2014) De manière générale, la vulnérabilité est le degré auquel un système ou une société est apte à faire face aux effets néfastes des CC. Comme illustré à la figure 3.1, la vulnérabilité d'un système est fonction du degré d'exposition et de la sensibilité du système aux risques climatiques. Ces impacts potentiels sont atténués par la capacité d'adaptation ou la résilience du système. Puisque les systèmes agricoles sont des écosystèmes contrôlés par l'humain, la vulnérabilité de l'agriculture aux CC dépend à la fois des effets biophysiques des CC et des actions mises en place par le secteur agricole pour modérer ces effets. Les mesures d'adaptation sont façonnées par plusieurs facteurs, comme le contexte d'exploitation (qualité des ressources naturelles, facteurs de stress non climatiques existants, les politiques et programmes gouvernementaux, etc.) l'accès à des options d'adaptation efficaces, ainsi que la capacité individuelle de l'agriculteur à mettre en œuvre des mesures d'adaptation. (Walthall et al., 2013)

Bref, les mesures d'adaptation doivent ultimement permettre de réduire la vulnérabilité des exploitations agricoles aux CC et de renforcer leur résilience.

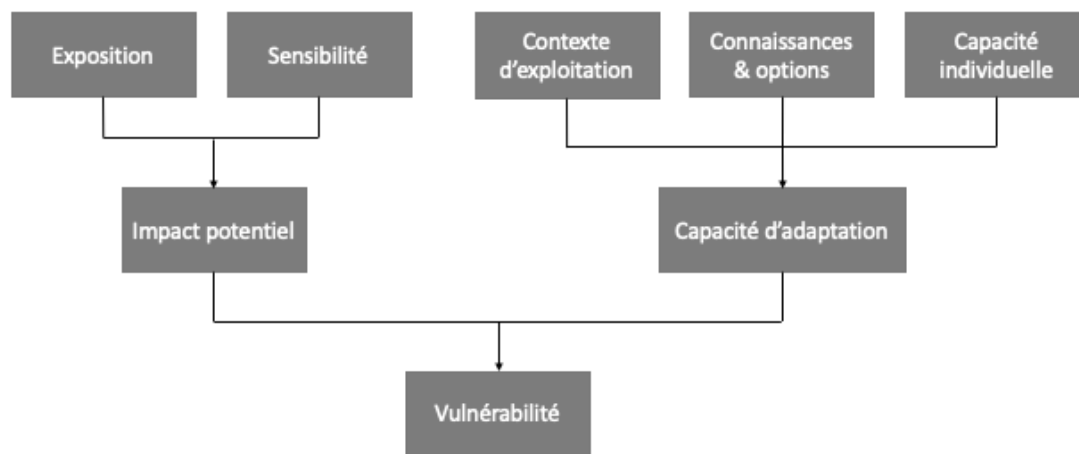


Figure 3.1 Facteurs humains et biophysiques qui déterminent la vulnérabilité ultime des systèmes agricoles aux changements climatiques (tiré de : Walthall et al., 2013, p. 119)

3.2 Facteurs et motifs de l'adaptation

Déjà en 1997, une étude de Bryant et al. se penchait sur l'impact du climat futur sur l'agriculture du Québec. Cette étude révélait que les agriculteurs semblaient peu préoccupés par des changements climatiques graduels et à long terme, entre autres parce que l'incertitude était encore élevée, mais aussi parce qu'ils faisaient face à d'autres sources de stress qui réduisaient l'importance accordée à cette problématique. Ils expliquaient aussi cette faible préoccupation par le fait que les agriculteurs ont appris au fil des années à s'adapter à de multiples changements, comme l'évolution rapide des technologies et du contexte sociopolitique, qui ont contribué à réduire leur vulnérabilité face aux aléas climatiques. Selon Bryant, les problèmes causés par les changements climatiques pouvaient, dans la majorité des cas, être résolus par la technologie. Par exemple, les agriculteurs n'avaient qu'à choisir des cultivars mieux adaptés aux nouvelles conditions, adopter de meilleures techniques d'irrigation et de drainage, etc.

Bien entendu, la gestion du risque et l'adaptation font partie du quotidien en agriculture et les agriculteurs doivent faire preuve d'un grand dynamisme. En effet, ils sont habitués de planifier en fonction des incertitudes et à anticiper les risques induits par plusieurs facteurs socio-économiques et climatiques. Le vrai problème est le rythme et la nature des changements climatiques dans les décennies à venir par rapport à la capacité d'adaptation des agriculteurs. Les CC amènent des conditions inhabituelles, comme de nouveaux extrêmes, des décalages saisonniers et une plus grande variabilité,

qui repoussent les limites de notre climat au-delà de ce que les agriculteurs sont habitués de gérer en termes de risques. (Janowiak et al., 2016; Crawford et al., 2012; Rosenzweig et Tubiello, 2007)

Par ailleurs, les agriculteurs ne considèrent pas seulement l'évolution des conditions et des risques climatiques lors de la mise en œuvre de mesures d'adaptation. En effet, la prise de décision en agriculture, y compris celle pour l'adaptation, est également influencée par de nombreux facteurs non climatiques, tels que les conditions économiques, sociales, familiales, environnementales, politiques et technologiques. Par exemple, les exploitants agricoles doivent s'adapter aux évolutions des marchés et des technologies, aux changements dans les politiques gouvernementales et les échanges internationaux, etc., ce qui complexifie grandement le processus d'adaptation. (Rosenzweig et Tubiello, 2007; Bryant et al., 2007; Smit et Skinner, 2002) Toutefois, il est important de mentionner que, même si le climat n'est pas une considération explicite dans la prise de décision, plusieurs actions entreprises par les agriculteurs peuvent avoir des avantages en termes d'adaptation aux CC (Janowiak et al., 2016).

3.3 Catégories d'adaptation

Il existe un grand nombre et une grande variété de mesures, de stratégies ou d'actions qui peuvent être entreprises en agriculture pour s'adapter aux CC. Smit et Skinner (2002) propose une typologie pour classer et caractériser les différentes options d'adaptation agricole aux CC. Plus particulièrement, ils différencient les options d'adaptation en agriculture en fonction de l'implication des différents acteurs (producteurs, industries, gouvernements); l'intention, le moment et la durée de l'emploi de la mesure d'adaptation; la forme et le type de la mesure d'adaptation. Les différentes caractéristiques des mesures d'adaptation sont présentées au tableau 3.1.

Tableau 3.1 Caractéristiques des mesures d'adaptation (tiré de : Smit et Skinner, 2002, p. 93-94)

CARACTÉRISTIQUE DE L'ADAPTATION	DESCRIPTION
Intention et objectif	L'intention et la détermination font la différence entre les adaptations qui sont entreprises spontanément ou de manière autonome, de celles qui sont consciemment et spécifiquement planifiées à la lumière des risques liés au climat.
Moment et durée	<p>Le moment de l'adaptation différencie les réponses anticipatives (proactives), actuelles (pendant) ou réactives (réactives).</p> <p>La durée de l'adaptation distingue les réponses en fonction de la période sur laquelle elles s'appliquent, comme tactique (à court terme) et stratégique (à plus long terme)</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ En agriculture, les adaptations tactiques peuvent comprendre des ajustements effectués au cours d'une saison afin de faire face à court terme à une condition climatique, telle qu'une sécheresse. ▪ Les adaptations stratégiques se réfèrent à des changements structurels dans l'exploitation agricole ou à des changements d'entreprises ou de gestion qui s'appliqueraient à une saison ultérieure ou à plus long terme.

Tableau 3.2 Caractéristiques des mesures d'adaptation (suite)

CARACTÉRISTIQUE DE L'ADAPTATION (SUITE)	DESCRIPTION (SUITE)
Échelle et responsabilité	<p>Les adaptations peuvent être distinguées en fonction de l'échelle à laquelle elles se produisent et de l'agent responsable de leur développement et de leur emploi.</p> <p>En agriculture, les adaptations se produisent à diverses échelles spatiales, y compris au niveau des parcelles, des champs, des fermes, des régions et même des pays.</p> <p>En même temps, la responsabilité peut être différenciée entre les divers acteurs qui entreprennent ou facilitent les adaptations dans l'agriculture, notamment les producteurs individuels (agriculteurs), l'agro-industrie (industries privées) et les gouvernements (agences publiques).</p>
Forme	<p>L'adaptation en agriculture se fait par le biais de divers processus et peut prendre de nombreuses formes différentes à une échelle donnée ou par rapport à un acteur donné.</p> <p>Les mesures d'adaptation peuvent être distinguées en fonction de leurs caractéristiques administratives, financières, institutionnelles, juridiques, managériales, organisationnelles, politiques, pratiques, structurelles et technologiques.</p>

Ainsi, Smit et Skinner (2002) identifient quatre catégories principales pour classer les options d'adaptation, soit le développement technologique, les programmes gouvernementaux et les assurances, les pratiques de production agricole et la gestion financière des exploitations agricoles (tableau 3.2).

Tableau 3.3 Catégories des options d'adaptation aux changements climatiques en agriculture (tiré de : Smit et Skinner, 2002, p. 96-97)

CATÉGORIES D'ADAPTATION	PRINCIPAUX ACTEURS IMPLIQUÉS	EXEMPLES
1. Développement technologique	<ul style="list-style-type: none"> Gouvernements et autres organismes publics Secteur privé (agro-industrie) 	<ul style="list-style-type: none"> Développement des cultures (nouvelles variétés, cultivars et hybrides) Systèmes d'information météorologique et climatique (systèmes d'alerte pour prévisions météorologiques quotidiennes et prévisions saisonnières) Innovations technologiques en matière de gestion des ressources (gestion de l'eau, irrigation)
2. Programmes gouvernementaux et assurances	<ul style="list-style-type: none"> Gouvernements et autres organismes publics Institutions privées 	<ul style="list-style-type: none"> Programme de subventions et de soutien à l'agriculture (assurance-récolte, programmes de stabilisation des revenus, programme de compensation) Assurance privée Programmes de gestion des ressources (politique et programme pour influencer l'utilisation des terres et des ressources en eau)

Tableau 3.4 Catégories des options d'adaptation aux changements climatiques en agriculture (suite)

CATÉGORIES D'ADAPTATION (SUITE)	PRINCIPAUX ACTEURS IMPLIQUÉS (SUITE)	EXEMPLES (SUITE)
3. Pratiques de production agricole	<ul style="list-style-type: none"> Agriculteurs 	<ul style="list-style-type: none"> Production agricole (diversification des types et variétés des cultures, modification de l'intensité de la production) Utilisation des terres (changement de l'emplacement des productions, pratiques alternatives de jachère et de travail du sol) Topographie du terrain (modifier la topographie du terrain) Calendrier des opérations (modification du calendrier des opérations agricoles)
4. Gestion financière agricole	<ul style="list-style-type: none"> Agriculteurs 	<ul style="list-style-type: none"> Achat d'une assurance-récolte Participation à un programme de stabilisation du revenu Diversification des sources de revenus

La typologie proposée s'appuie sur l'échelle à laquelle les mesures d'adaptation sont entreprises et sur les différents acteurs qui sont impliqués. En effet, les catégories 1 et 2 relèvent principalement des agences gouvernementales et des industries du secteur privé, tandis que les catégories 3 et 4 impliquent majoritairement la prise de décision au niveau de l'exploitation par les agriculteurs. Bien entendu, les catégories sont souvent interdépendantes. Par exemple, une technologie développée par le gouvernement et le secteur privé (catégorie 1) pourrait être adoptée par les agriculteurs pour modifier les pratiques de production agricole (catégorie 3). Similairement, un producteur peut acheter plus d'assurance-récolte (catégorie 4), lorsque cette assurance est fournie ou subventionnée par le gouvernement (catégorie 2). (Smit et Skinner, 2002)

Cet essai se concentre donc principalement sur les options d'adaptation qui s'appliquent au niveau de la ferme, où l'agriculteur a le contrôle pour la prise de décision et la mise en œuvre. Le chapitre 4 traite des options d'adaptation associées aux pratiques agricoles (catégorie 3) et le chapitre 5 explorent les différentes technologies (catégorie 1) qui soutiennent l'adaptation aux CC, notamment celles associées à l'agriculture de précision.

3.4 Concepts clés de l'adaptation au niveau de la ferme

L'adaptation au niveau de la ferme se concentre sur des mesures techniques qui modifient les modes de production, les pratiques, les structures et les stratégies de l'exploitation. Ces mesures doivent répondre

aux besoins spécifiques qui dépendent à la fois de l'impact climatique, de la situation économique de la ferme, de la taille de la ferme et de la scolarité de l'agriculteur (Jacobs et al., 2019). L'un des objectifs des mesures d'adaptation devraient aussi être d'assurer la durabilité de la ferme sur le long terme. Certes, il n'existe pas de solutions universelles qui puissent s'appliquer à tous les contextes. Il y a toutefois des concepts clés à considérer lors de l'élaboration de mesures d'adaptation. En règle générale, ces mesures doivent permettre de renforcer la résilience des systèmes de production et la capacité d'adaptation des producteurs. La sélection des mesures d'adaptation les plus appropriées à la situation de chaque entreprise agricole doit donc s'appuyer sur certains principes.

L'agriculture intelligente face au climat (AIC) ou *Climate Smart Farming* (CSA) est l'approche de gestion agricole développée par la FAO qui permet aux exploitants agricoles de gérer efficacement les impacts des CC. L'AIC est définie comme un système agricole qui répond à trois objectifs, soit l'augmentation durable de la productivité et des revenus, l'adaptation aux CC et la réduction des émissions de GES. Évidemment, chaque pratique appliquée au niveau de la ferme ne doit pas atteindre ces trois objectifs simultanément. L'AIC n'est pas non plus un ensemble de pratiques universelles, mais bien une approche qui vise à élaborer des solutions à l'échelle locale pour minimiser les effets négatifs des CC et promouvoir les synergies. (FAO, 2020)

Par ailleurs, comme l'agriculture et le climat sont si intrinsèquement liés, il est important d'établir une stratégie globale qui implique de profiter du potentiel de synergie entre les actions visant l'adaptation aux changements climatiques et celles visant l'atténuation (Smith et Olesen, 2010; Janowiak et al., 2016). En effet, les mesures d'adaptation qui permettent de réduire les émissions de GES ou de séquestrer le carbone atmosphérique (atténuation) tout en diminuant la vulnérabilité aux effets des CC (adaptation) sont des stratégies plus intéressantes (Pitesky et al., 2014). Par exemple, les pratiques agricoles qui favorisent l'augmentation de la teneur en matière organique des sols seront bénéfiques autant pour l'atténuation des GES (séquestration du carbone dans le sol) que pour l'adaptation aux CC (meilleure infiltration de l'eau lors d'épisodes de pluies intenses) (Janowiak et al., 2016; Blondot, 2018, 30 avril). Aussi, une bonne stratégie d'adaptation implique de bénéficier des opportunités créées par les CC. Par exemple, l'allongement de la saison de croissance et l'augmentation des unités thermiques pourraient favoriser la productivité et l'expansion de certaines cultures comme le maïs et le soya. Il est donc nécessaire de développer des stratégies proactives pour tirer profit de ces opportunités. (Ouranos, 2015)

Enfin, les agriculteurs disposent de nombreux outils pour lutter contre les CC. Ils doivent cependant s'appuyer sur certains principes pour choisir les meilleures options d'adaptation en fonction de leur situation. Ces principes sont présentés au tableau 3.3.

Tableau 3.5 Principes de l'adaptation (tiré de : Janowiak et al., 2016, p. 12)

PRINCIPES	EXPLICATION
Priorisation	Prioriser les actions d'adaptation en fonction du niveau de vulnérabilités des ressources et de la probabilité que ces actions réduisent efficacement leur vulnérabilité.
Gestion flexible et adaptative	Maintenir un cadre de prise de décision flexible et incorporant de nouvelles connaissances et expériences acquises au fil du temps, plus spécifiquement les impacts des changements climatiques observés.
Décision « sans regret »	Rechercher des actions qui se traduisent par une grande variété d'avantages selon plusieurs scénarios et qui comportent peu ou pas de risque.
Mesures de précaution	Lorsque la vulnérabilité est élevée, il est très important de prendre des mesures de précaution pour réduire les risques à court terme.
Soutenir l'atténuation	De nombreuses actions d'adaptation sont complémentaires aux actions d'atténuation des émissions de GES. Les pratiques qui aident à adapter les exploitations aux conditions changeantes peuvent également réduire les émissions ou séquestrer le carbone atmosphérique.

4. ADAPTATION DES PRATIQUES AGRICOLES

La plupart des pratiques mises de l'avant dans ce chapitre sont communément associées aux principes de l'agroécologie, de l'agriculture durable ou encore de l'agriculture biologique (Hatfield et al., 2014). Ce ne sont pas de nouvelles pratiques, mais bien un ensemble de pratiques qui sont reconnues pour minimiser les perturbations dues au climat (adaptation), en plus de réduire l'empreinte environnementale globale et d'améliorer la rentabilité des exploitations (Brewer et al., 2018). Les objectifs de ces mesures d'adaptation sont de maintenir une production résiliente et rentable, d'améliorer la gestion des sols et des ressources en eau, de limiter l'impact des ennemis de cultures et de réduire les émissions de GES.

L'Université de Cornell, situé dans l'État de New York, a lancé un programme d'AIC afin de promouvoir les stratégies d'adaptation pour les agriculteurs du nord-est des États-Unis. Ce programme encourage les agriculteurs à modifier leurs pratiques et leurs systèmes pour réduire la gravité des impacts climatiques. Les cinq stratégies détaillées au tableau 4.1 sont des mesures que les agriculteurs peuvent mettre en œuvre pour réduire les risques et améliorer la durabilité de leur ferme. Prises ensemble, ces pratiques contribuent à accroître la résilience d'une exploitation agricole à court et long terme. (Brewer et al., 2018) Même si le contexte agricole de l'État de New York diffère de celui du Québec, ces stratégies peuvent servir de base pour les agriculteurs québécois dans la planification de leurs stratégies d'adaptation.

Tableau 4.1 L'agriculture intelligente face au climat : cinq stratégies pour l'adaptation aux changements climatiques (inspiré de : Brewer et al., 2018)

STRATÉGIES	EXPLICATION	PRATIQUES D'ADAPTATION ASSOCIÉES
1. Se concentrer sur la santé des sols	Le réchauffement des températures et les précipitations extrêmes ou la sécheresse augmenteront la possibilité que le stress hydrique du sol affecte toutes les cultures. Un sol sain, bien structuré et protégé par la végétation capture plus d'eau et est moins sensible au ruissellement de surface, à la compaction et à l'érosion lors de fortes pluies.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Réduire la fréquence et l'intensité du travail du sol et utiliser la méthode du semis direct si possible. ▪ Utiliser des méthodes de travail du sol qui préservent les résidus de récolte à la surface du sol afin de minimiser le temps où le sol est à nu. ▪ Augmenter les apports de matière organique grâce aux cultures de couverture, aux résidus de récolte, au fumier et au compost. ▪ Utiliser des cultures de couverture d'hiver et d'été entre les cultures principales pour maximiser la protection de la surface du sol. ▪ Élaborer un plan de rotation pour maximiser l'utilisation des cultures pérennes dans la rotation pour éviter le travail du sol le plus possible. ▪ Réduire la compaction du sol en minimisant les passages d'équipement sur les champs. ▪ Éviter autant que possible le travail du sol à l'automne et la jachère nue en hiver.

Tableau 4.2 L'agriculture intelligente face au climat : cinq stratégies pour l'adaptation aux changements climatiques (suite)

STRATÉGIES (SUITE)	EXPLICATION (SUITE)	PRATIQUES D'ADAPTATION ASSOCIÉES (SUITE)
2. Gérer efficacement les ressources en eau et les risques liés aux précipitations	Une gestion efficace de l'eau est essentielle pour mieux gérer la fréquence accrue des événements de précipitations extrêmes, des tempêtes, des inondations et de l'allongement des périodes de sécheresse à court terme.	<ul style="list-style-type: none"> Améliorer l'efficacité de l'irrigation en utilisant les dernières technologies, comme l'irrigation goutte à goutte. Installer un réseau de drainage souterrain dans les champs pour éliminer l'excès d'eau et contrôler le ruissellement. Améliorer les systèmes d'approvisionnement en eau pour combler les besoins futurs et augmenter la capacité de stockage de l'eau en construisant des puits et des étangs plus profonds. Prévoir des applications d'engrais et de fumier en fonction des prévisions météorologiques. Planter ou gérer des bandes riveraines le long des ruisseaux et des étangs pour capter le ruissellement et intégrer l'agroforesterie dans les systèmes agricoles pour augmenter l'efficacité de l'utilisation de l'eau pendant les périodes sèches.
3. Utiliser la gestion intégrée des ravageurs	Les risques liés aux insectes envahissants connus et nouveaux, aux mauvaises herbes et aux agents pathogènes vont augmenter sous le réchauffement climatique.	<ul style="list-style-type: none"> S'informer des nouvelles menaces et être conscient des cycles de vie et de la propagation des ravageurs. Effectuer un dépistage régulier des mauvaises herbes, des insectes et des agents pathogènes et les contrôler avec des stratégies éprouvées. Utiliser des variétés de cultures résistantes aux ravageurs et aux agents pathogènes. Utiliser les méthodes de lutte culturelle et biologique des ravageurs chaque fois que possible. Utiliser correctement les pesticides appropriés lorsque les ravageurs ou les agents pathogènes dépassent les seuils économiques. Adopter des mesures sanitaires (par exemple, nettoyer l'équipement entre les champs) pour réduire la propagation des ravageurs et des agents pathogènes.
4. Diversifier les entreprises agricoles, les espèces et les variétés de cultures	La diversification des entreprises agricoles et des cultures est une politique d'autoassurance pour gérer l'incertitude dans un environnement en constante évolution. Le choix d'une diversité de cultures renforce la résilience financière en réduisant les pertes globales dues aux événements météorologiques extrêmes et aux fluctuations du marché.	<ul style="list-style-type: none"> Être ouvert au changement. Choisir une variété de produits, de produits agricoles et de services qui protègent contre les menaces météorologiques, environnementales, commerciales et géopolitiques. Diversifier la production agricole et les rotations des cultures et les cultures intercalaires avec plusieurs espèces ou variétés. Sélectionner des variétés de cultures en fonction des dates de maturité et de la génétique pour correspondre à la durée de saison prévue, aux précipitations et à la sécheresse, ainsi qu'aux pressions des ravageurs et pathogènes.
5. S'engager dans la planification agricole et la gestion adaptative	Le renforcement de la résilience contre les menaces liées au climat nécessite une planification et un examen minutieux des opérations agricoles et de l'ensemble de l'entreprise. Des données de référence sont nécessaires pour prendre des décisions de gestion de l'ensemble de l'exploitation.	<ul style="list-style-type: none"> Élaborer un plan d'adaptation pour identifier vos risques et les pratiques pour y remédier. Mener un audit énergétique de l'ensemble de la ferme pour augmenter l'efficacité énergétique et les opportunités pour les sources d'énergie renouvelable. Utiliser des applications d'agriculture de précision et des outils météorologiques et climatiques pour prendre des décisions de production agricole plus éclairées. Les bâtiments agricoles neufs et rénovés devraient être écoénergétiques et conçus pour résister aux conditions météorologiques prévues, y compris les fortes chaleurs, les fortes précipitations, le vent et les charges de neige. Lors de l'achat de nouveaux équipements agricoles, sélectionner des options pour maximiser le rendement énergétique et réduire les contraintes de main-d'œuvre et de temps. Envisager de souscrire une assurance-récolte pour réduire les risques économiques.

De même, plusieurs experts québécois travaillent sur l’adaptation aux CC du milieu agricole. Par exemple, lors d’une présentation pour les Journées sur l’innovation et le progrès en agroalimentaire au Centre-du-Québec (INPACQ) en 2019, Anne Blondlot (coordonnatrice du programme Agriculture, Pêches et Aquaculture commerciales chez Ouranos) a présenté cinq objectifs d’adaptation pour les productions végétales au Québec, ainsi que les pratiques qui permettent d’atteindre ces objectifs (tableau 4.2).

Tableau 4.3 Cinq objectifs pour s’adapter aux changements climatiques et les pratiques d’adaptation en production végétale au Québec. (tiré de : Blondlot, 2019, p. 24)

OBJECTIFS	PRATIQUES D’ADAPTATION
Objectif 1 : Améliorer la structure des sols	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Conservation du sol ▪ Couvrir le sol ▪ Éviter la compaction
Objectif 2 : Optimiser la gestion de l’eau de surface	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Drainage et nivellement ▪ Planter des bandes riveraines ▪ Participer aux actions collectives
Objectif 3 : Améliorer la gestion de l’irrigation	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Stockage de l’eau
Objectif 4 : Conserver la neige	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Clôtures à neige (naturelles ou artificielles)
Objectif 5 : Améliorer la lutte contre les ennemis des cultures	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dépister les insectes, maladies et mauvaises herbes ▪ Améliorer la lutte intégrée

Ainsi, ce chapitre détaille les pratiques agricoles les plus couramment mentionnées dans la littérature scientifique au sujet de l’adaptation aux CC de l’agriculture. Chaque pratique correspond à différents impacts des CC et peut être pertinente pour différents types de production (grandes cultures, fruits et légumes, etc.). Tout d’abord, la section 4.1 inclut les pratiques de conservation des sols qui apportent plusieurs bénéfices en termes d’adaptation et d’atténuation, soit les cultures de couverture, la réduction de la compaction du sol, le travail réduit du sol et le semis direct, ainsi que la diversification et la rotation des cultures. La section 4.2 porte sur les pistes d’adaptation concernant la gestion l’eau. La section 4.3 explique les bénéfices des aménagements agroforestiers tels que les haies brise-vent et les bandes riveraines. La section 4.4 détaille le concept de lutte intégrée contre les ennemis des cultures. Enfin, la section 4.5 aborde les stratégies de gestion de cultures telles que les ajustements au niveau du calendrier des cultures, ainsi que la sélection des espèces ou variétés de cultures qui sont adaptées aux nouvelles conditions climatiques ou résistantes aux différents ennemis des cultures.

4.1 Pratiques de conservation des sols et mesures préventives

Il y a un lien direct entre la santé des sols cultivés et la rentabilité et la qualité des productions agricoles (MAPAQ, 2018c). Les pratiques qui permettent de conserver les sols et d'améliorer leur santé constituent une solution gagnante pour augmenter les rendements, en plus de contribuer significativement à l'adaptation et à l'atténuation des CC (Morand et al., 2017). D'ailleurs, dans sa *Stratégie gouvernementale d'adaptation aux changements climatiques 2013-2020*, le gouvernement du Québec mentionne qu'une des solutions d'adaptation pour réduire la vulnérabilité du secteur agricole aux CC est d'adapter les pratiques de conservation des sols et de miser davantage sur la préservation et l'amélioration des sols agricoles québécois (Gouvernement du Québec, 2012).

La figure 4.1 produite par Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) montre la variation de la teneur en carbone organique des sols agricoles canadiens au cours de l'année 2011.

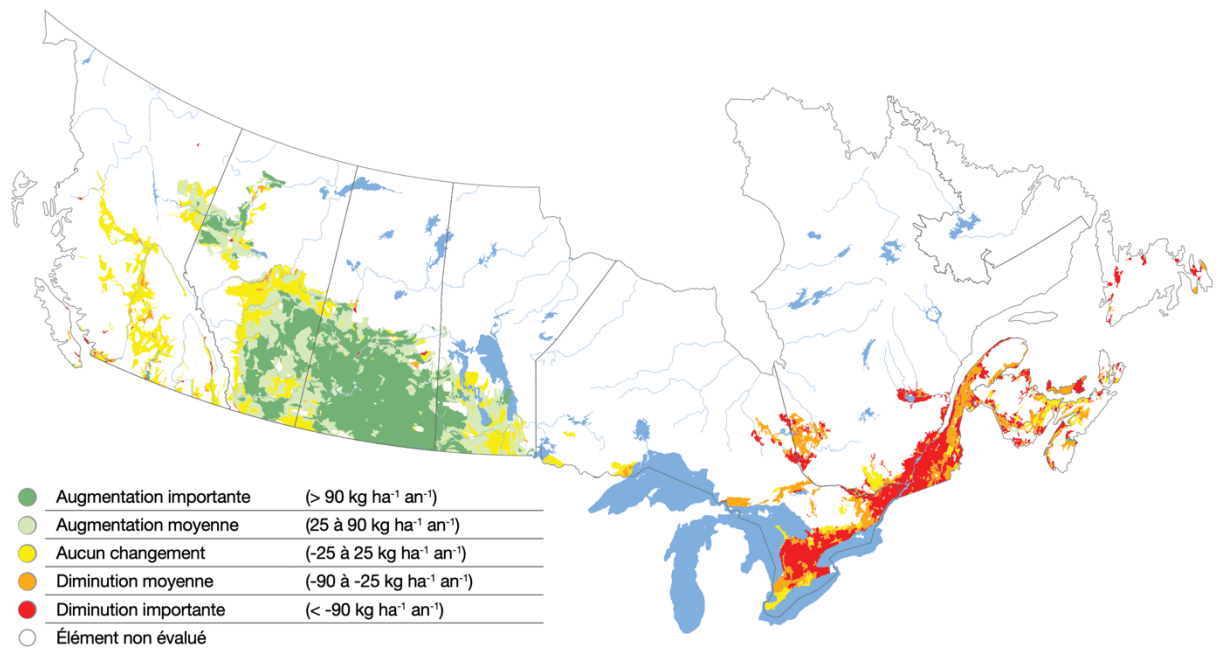


Figure 4.1 Variation de la teneur en carbone organique du sol au Canada en 2011 (tiré de : Clearwater, Martin et Hoppe, 2016, p. 93)

On constate que la concentration de matière organique des sols a augmenté dans les prairies canadiennes, tandis qu'elle a diminué dans l'est du Canada. On peut conclure que les sols agricoles québécois émettent du carbone plutôt que d'en séquestrer et que la santé des sols se dégrade significativement. L'augmentation de la séquestration du carbone dans les prairies canadiennes s'explique en grande partie par la réduction des superficies en jachère et l'adoption de pratiques de

travail réduit du sol. Ces pratiques permettent d'augmenter les résidus de culture et favorisent l'accumulation de matière organique dans le sol. Au Québec, la mise en jachère des terres n'est pas une pratique courante, mais le travail classique est encore utilisé sur plus de 40 % des terres cultivées (figure 4.2). (Clearwater et al., 2016; Statistique Canada, 2018b)

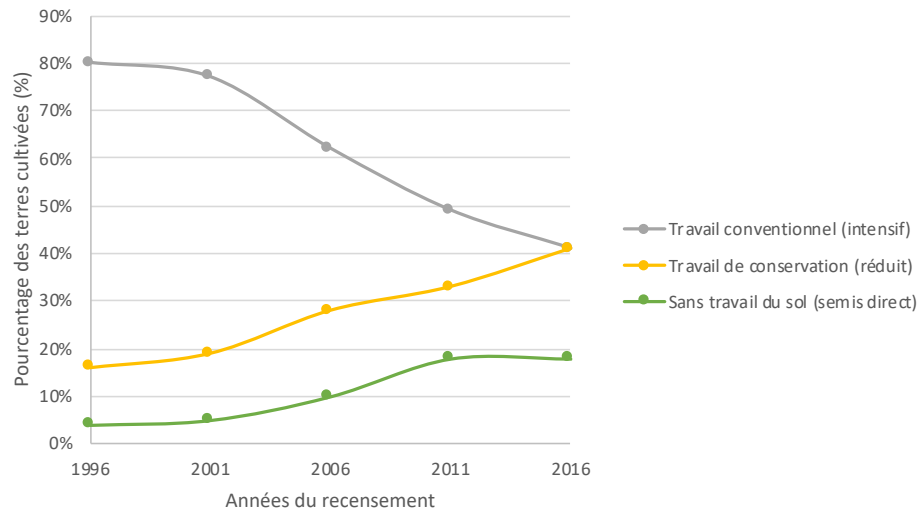


Figure 4.2 Pourcentage des terres cultivées selon les différentes pratiques de travail de sol au Québec de 1996 à 2016 (modifié de : Clearwater et al., 2016; Statistique Canada, 2018b)

Pour être plus résilients face aux nouvelles conditions climatiques et aux événements climatiques extrêmes, les agriculteurs québécois ont avantage à améliorer la santé de leurs sols. Un sol riche en matière organique et en microorganismes et protégé par la végétation a une meilleure rétention d'eau et est moins sensible au ruissellement de surface, à la compaction et à l'érosion hydrique et éolienne. La mise en œuvre de pratiques de conservation des sols est donc une stratégie d'adaptation au CC très efficace pour les agriculteurs. (Brewer et al., 2018; Morand et al., 2017)

Ces pratiques incluent les cultures de couverture, ainsi que le travail réduit et le semis direct. Des mesures préventives telles que la réduction de la compaction du sol et la diversification et la rotation des cultures permettent également de conserver ou d'améliorer la santé des sols.

4.1.1 Cultures de couverture et engrais verts

Les cultures de couverture et les engrais verts gagnent en popularité depuis quelques années dans les cultures annuelles, surtout en grandes cultures, mais aussi en horticulture (Giroux, 2014). Elles sont composées d'une plante (ou d'un mélange de plantes) semée pendant (intercalaire) ou après (en dérobée) la culture principale (Agrobonsens, s. d.). D'ailleurs, la saison de croissance plus longue en

climat futur facilitera l'établissement des cultures de couverture en dérobée, ce qui constitue une bonne nouvelle en soi (Michaud et al., 2012). Environ 30 espèces de 3 familles différentes (légumineuses, graminées et crucifères) ont été identifiées comme des espèces appropriées pour l'est du Canada. Un outil Web d'aide à la décision a été développé pour aider les agriculteurs à choisir les cultures de couverture qui correspondent à leurs besoins en fonction de plusieurs variables comme leur situation géographique, le type de sol, le système cultural et leurs objectifs. (AAC, 2014)

Ces cultures ne sont donc pas récoltées pour être vendues; elles servent de couvert végétal pour protéger le sol le plus longtemps possible et elles sont ensuite détruites et enfouies pour enrichir le sol (engrais verts) (Martin et al., 2011). Les cultures de couverture et les engrais verts sont bien documentés pour leurs multiples bénéfices économiques, agronomiques et environnementaux (Jobin et Douville, 1997; Martin et al., 2011; Ball Coelho, 2011; Audet, 2012; CRAAQ, 2016; Vanasse, 2017; Lefebvre et Leblanc, 2018; Belzile et al., 2018), mais aussi pour l'atténuation et l'adaptation aux CC (Camirand et Gingras, 2009; Poeplau et Don, 2015; USDA Northeast Climate Hub, 2016; Kaye et Quemada, 2017; Michaud et al., 2020).

Les engrais verts améliorent la santé et la fertilité du sol puisqu'ils augmentent le taux de matière organique et stimulent l'activité biologique du sol. Aussi, ils fertilisent le sol en mobilisant les éléments fertilisants en surface, ce qui réduit les besoins d'engrais chimiques ou de fumier. (Martin et al., 2011) Plus particulièrement, l'utilisation de légumineuses comme engrais verts permet de fixer l'azote atmosphérique et le rend disponible pour les cultures suivantes, ce qui peut améliorer le rendement de celles-ci (Delgado et Gantzer, 2015). Les cultures de couverture peuvent aussi réduire considérablement le risque de dégradation des sols exacerbé par les CC en protégeant le sol contre l'érosion hydrique et éolienne et le lessivage des éléments nutritifs. En effet, elles améliorent la structure du sol, ce qui augmente la capacité d'infiltration de l'eau et se traduit par un meilleur drainage de surface. (MAPAQ, 2020a)

Par ailleurs, les cultures de couvertures sont aussi considérées comme un moyen efficace pour lutter contre les ennemis des cultures, autant en productions maraîchères qu'en grandes cultures. Elles permettent de réduire la propagation des mauvaises herbes en opposant une barrière physique à leur croissance, ce qui leur laisse moins de chance de s'établir et diminue leur banque de semence. (Martin et al., 2011; MAPAQ, 2020a) Dans certains cas, elles contribuent à briser le cycle vital de certaines maladies ou de certains insectes (Martin et al., 2011; AAC, 2014).

De plus, les cultures de couverture contribuent de façon non négligeable à l'atténuation des CC en séquestrant le carbone atmosphérique dans le sol et en diminuant l'effet albédo du sol (Kaye et Quemada, 2017). Une étude suédoise a estimé que l'adoption de cette pratique à grande échelle pourrait potentiellement compenser 8 % des émissions annuelles de GES provenant de l'agriculture (Poeplau et Don, 2015).

Les coûts d'implantation des cultures de couverture comprennent principalement le coût de la semence et des opérations culturales nécessaires à l'implantation (CRAAQ, 2016). Selon l'espèce choisie, une culture de couverture coûte au minimum 60 \$/ha à la dérobée et de 50 à 175 \$/ha en intercalaire. Il y a d'ailleurs un programme de subvention intitulé « Programme Prime-Vert Volet 1 — Pratique de conservation des sols » qui offre une aide de 52-67 \$/ha pour une superficie minimale de 10 ha. Ce programme est en vigueur jusqu'en 2023. (Agrobonsens, s. d.; CRAAQ, 2016) Il y a aussi d'importantes retombées économiques qui en découlent, notamment lorsque l'utilisation d'une légumineuse permet des économies en engrais azoté. L'utilisation du trèfle pourrait engendrer des économies en azote sur la culture suivante de 30 à 120\$/ha. À cela pourraient s'ajouter les nombreux avantages qui sont difficiles à chiffrer, comme l'apport en matière organique, le décompactage du sol, la rétention des nutriments lessivable, etc. (Agrobonsens, s. d.)

D'après le dernier recensement de l'agriculture (2016), près de 14 % des fermes québécoises implantaient des engrais verts pour enfouissement et 7 % implantaient des cultures de couverture d'hiver. (Statistique Canada, 2020b)

4.1.2 Travail réduit du sol et semis direct

Le travail conventionnel (intensif) du sol consiste à labourer le sol en profondeur en retournant la terre à l'aide de machinerie (travail primaire) puis à effectuer un travail secondaire sur les premiers centimètres de terre pour préparer le lit de semence. Ces étapes permettent de niveler la surface du sol, d'incorporer les différents intrants (engrais, amendements et pesticides), de détruire les mauvaises herbes et d'enfouir les résidus de récolte. (Pigeon et al., 2012) Cette pratique a aussi comme objectif d'accélérer la décomposition des résidus en les coupant en petits morceaux et en les enfouissant dans le sol. Toutefois, les résultats d'une étude récente qui a examiné l'effet des différentes techniques de travail du sol (travail conventionnel, travail du sol en bande et semis direct) sur la décomposition des résidus de maïs ont montré qu'il n'y avait aucune différence significative entre ces trois méthodes (Al-Kaisi, 2019).

Le travail réduit du sol (ou travail de conservation) est une méthode moins intensive qui vise à maintenir une portion des résidus de culture pour couvrir au moins 30 % du sol. Il consiste à briser ou soulever le sol (travail primaire) plutôt que de le retourner comme en travail conventionnel. Le travail secondaire est aussi fait de manière moins agressive qu'en travail conventionnel. (Conseil des productions végétales du Québec [CPVQ], 2000) Le semis direct consiste à établir une culture sans avoir travaillé le sol au préalable. La seule étape est donc celle du semis et la totalité des résidus de récolte est donc conservée sur la surface du sol. Les techniques de travail réduit du sol et de semis direct sont relativement bien documentées et leur adoption par les agriculteurs québécois est en hausse constante (tableau 4.3) (Pigeon et al., 2012). Pour aller encore plus loin, il est possible d'implanter des systèmes de semis direct sous couverture végétale (SCV) permanente. Les SCV sont des systèmes de production dans lesquels la culture principale est semée directement dans une culture de couverture qui occupe le champ en permanence. Il s'agit donc de combiner les avantages des cultures de couverture et du semis direct (Moreau-Richard, s. d.; Thibaudeau et Thibault, 2013; Pérusse et al., 2013).

Par ailleurs, bien qu'il procure certains avantages, le travail intensif du sol a des répercussions importantes sur la santé du sol et sur les CC. D'abord, l'intensité du travail influence significativement la teneur en carbone organique du sol. Ainsi, le travail conventionnel conduit à des pertes importantes de carbone organique du sol (émissions de GES), ce qui dégrade significativement la santé du sol et contribue aux CC. À l'inverse, le travail réduit ou le semis direct améliore la santé du sol en amplifiant la séquestration de carbone atmosphérique (atténuation), ce qui augmente la teneur en carbone organique dans le sol. (Al-Kaisi et Kwaw-Mensah, 2020) Le travail conventionnel a aussi un effet direct sur la sensibilité des sols à l'érosion éolienne et hydrique. La couverture de résidus laissée à la surface du sol dans le cas du travail réduit ou du semis direct permet de protéger le sol en réduisant considérablement le ruissellement de surface et l'érosion, ce qui limite les pertes d'éléments nutritifs. Les résidus favorisent également l'activité biologique dans le sol en fournissant du carbone et de l'azote aux microorganismes. Les effets positifs sur la santé des sols permettent aussi de minimiser la compaction des sols. (CPVQ, 2000)

En plus d'affecter la santé des sols et d'augmenter les risques d'érosion et de détérioration de la qualité de l'eau, le travail conventionnel représente des coûts additionnels en main-d'œuvre et en machinerie. En effet, l'utilisation de cette méthode entraîne une demande énergétique élevée en raison de l'augmentation de la puissance de traction requise pour labourer et du nombre de passages nécessaires dans le champ. Les techniques de travail réduit et de semis direct permettent donc de réduire

significativement les frais de carburant. Un agriculteur peut s'attendre à des économies de carburant de l'ordre de 25 à 35 % en passant aux techniques de travail réduit du sol et de 70 à 75 % pour le semis direct, et ce, pour l'ensemble des cultures. En plus des économies de carburant, la transition au travail réduit ou au semis direct permet d'améliorer la rentabilité de la production grâce à une réduction des frais d'entretien de la machinerie et une réduction du temps de main d'œuvre. Ainsi, à moyen terme, le travail réduit et le semis direct permettraient des économies de l'ordre de 10 \$/ha et de 25 \$/ha respectivement. Il est toutefois important de mentionner que cette transition se fait sur plusieurs années. Un tel transfert peut être complexe pour certains agriculteurs et des investissements initiaux sont nécessaires, notamment pour l'acquisition de nouvelles machineries. (Pigeon et al., 2012)

Ainsi, les pratiques de travail réduit du sol et de semis direct sont considérées comme de bonnes stratégies d'adaptation aux CC, puisqu'elles permettent de limiter les impacts des événements climatiques extrêmes (sécheresses et pluies intenses), de réduire les émissions de GES et de séquestrer du carbone atmosphérique (atténuation), en plus d'augmenter le rendement et la rentabilité globale de la production.

Comme indiqué au tableau 4.3, 41 % et 18 % des terres cultivées en 2016 utilisaient les techniques de travail réduit du sol et de semis direct respectivement. Il y a donc encore environ 40 % des terres cultivées qui utilisent le travail conventionnel. Par contre, on peut s'attendre à une augmentation des superficies cultivées sur résidus (travail réduit et semis direct), puisque la faisabilité de ces méthodes sera favorisée en climat futur, notamment en raison du ressuyage hâtif des terres au printemps (Michaud et al., 2012).

4.1.3 Réduction de la compaction du sol

La compaction des sols est un sérieux problème en production végétale. Ce phénomène se traduit par une augmentation de la densité du sol en raison de la diminution du volume d'air qu'il contient. Les principales causes sont : le poids excessif de la machinerie, la fréquence de passage de la machinerie, l'utilisation de la machinerie dans des conditions non favorables (taux d'humidité élevé), la faible surface de contact et la pression des pneus, la faible teneur en matière organique du sol, le travail excessif qui dégrade la structure du sol, ainsi que la monoculture. (Lamarre, 2014; MAPAQ, 2002)

Les problématiques liées à la compaction des sols sont multiples. D'abord la compaction peut engendrer des pertes économiques en raison de la diminution de la productivité des cultures. Les pertes de

rendement peuvent être attribuées, entre autres, à une réduction de l'aération du sol, au développement racinaire limité, aux carences en nutriments, à une diminution de l'eau disponible dans le sol, ainsi qu'à la dégradation de la structure du sol. La compaction accentue aussi les risques d'érosion et de ruissellement de surface, puisque le taux d'infiltration de l'eau est réduit, ce qui provoque une augmentation des pertes de sédiments et de nutriments. Il peut aussi en résulter d'importantes conséquences sur l'environnement, telles que la pollution diffuse vers les cours d'eau. (Lamarre, 2014; Al-Kaisi, 2016; MAPAQ, 2002; Michaud et al., 2012)

Par ailleurs, la compaction des sols peut aussi contribuer aux CC. En effet, des sols compactés et peu aérés sont plus propices à la dénitrification de l'azote minéral, ce qui provoque une augmentation des émissions de N_2O (puissant GES) (Sitaula et al., 2000; Camirand et Gingras, 2009). Également, un sol compacté augmente l'énergie nécessaire pour effectuer le travail du sol avec la machinerie, ce qui induit une augmentation de la consommation d'essence de la machinerie et augmente les émissions de CO_2 associées (MAPAQ, 2002).

Les agriculteurs ont donc intérêt à mettre en place des techniques pour minimiser la compaction du sol. L'ajustement de la taille et de la pression des pneus est un moyen efficace pour augmenter la surface de contact du pneu sur le sol. En effet, des pneus plus gros avec une pression d'air réduite permettent de limiter la charge sur le sol. Aussi, puisqu'une humidité élevée du sol augmente la compaction causée par la circulation de la machinerie, un des moyens les plus efficaces d'éviter ce phénomène est de vérifier l'humidité du sol et de limiter les opérations sur le terrain lorsque celle-ci est trop élevée. Aussi, l'implantation de certaines espèces de culture de couverture comme le radis et le sorgho (système racinaire extensif) aide à décompacter du sol (Martin et al., 2011; Weill et Roy-Fortin, 2014; Brown et al., 2017). Enfin, l'intensité du travail du sol augmente considérablement les risques de compaction puisque la structure du sol est fragilisée. La réduction du travail du sol, en passant au technique de travail réduit ou de semis direct, est donc un bon moyen pour éviter la compaction. (Al-Kaisi, 2016)

4.1.4 Diversification et rotation des cultures

Il y a actuellement une tendance importante à la spécialisation des entreprises agricoles (Ouranos, 2015). Pourtant, la diversification au niveau de la ferme est une pratique qui a été identifiée par plusieurs chercheurs comme une stratégie d'adaptation intéressante pour réduire les risques attribuables aux CC (Bradshaw, Dolan et Smit, 2004; Lepage et al., 2012a; Brewer et al., 2018; Jacobs et al., 2019). Par exemple, la diversification géographique (augmenter le nombre de sites de production) et

la diversification des cultures (augmenter le nombre de cultures ou de variétés/hybrides d'une culture particulière) permettent de renforcer la résilience financière d'une exploitation agricole en réduisant les pertes globales dues aux aléas climatiques ou aux épidémies de ravageurs (Bradshaw et al., 2004; Brewer et al., 2018). En effet, cette stratégie permet de répartir le risque de perte d'une récolte, puisque les différentes cultures réagissent différemment aux conditions météorologiques et climatiques, ainsi qu'aux ravageurs (Jacobs et al., 2019). Aussi, la diversification des cultures ou encore la diversification des entreprises (augmentation du nombre d'activités commercialisables) s'avèrent une stratégie efficace pour gérer les risques commerciaux, comme la fluctuation du marché (Bradshaw et al., 2004; Jacobs et al., 2019). Ainsi, la diversification, sous toutes ses formes, agit comme une politique d'autoassurance afin de gérer l'incertitude et les risques qui sont exacerbés par les CC (Brewer et al., 2018). L'allongement et le réchauffement de la saison de croissance pourraient jouer en faveur de la diversification au niveau de la ferme, puisque les agriculteurs auront la possibilité d'introduire de nouvelles variétés et de nouvelles cultures (Ouranos, 2015).

Ensuite, en opposition à la monoculture, la rotation (ou assolement) des cultures est une stratégie qui consiste à établir une succession annuelle de différentes cultures (au moins trois cultures différentes) sur une même parcelle de terre. Le choix des espèces et leur séquence planifiée permettent ainsi de retirer divers bénéfices en fonction des besoins propres à chaque exploitation agricole. En effet, la rotation des cultures la plus efficace est celle qui succède des familles différentes, incluant des cultures de couverture. (Brown et al., 2017) Lorsqu'elle est bien planifiée, la rotation des cultures amène de multiples avantages aux niveaux agronomique, environnemental et économique (Carrier, 2005; Robert, 2008, novembre; Agrobonsens, s. d.). À long terme, une longue rotation diversifiée fournit un éventail de services écosystémiques qui permettent de renforcer la résilience des cultures contre les impacts des CC, en plus de contribuer à l'atténuation des émissions de GES et d'augmenter la rentabilité globale des exploitations agricoles (Jacobs et al., 2019). Des outils comme *Rotation\$+* (<https://rotation.craaq.qc.ca>) peuvent venir en aide aux agriculteurs pour développer différents scénarios de rotation et faciliter la prise de décision.

D'abord, la rotation des cultures contribue à conserver la santé du sol en améliorant sa structure et sa teneur en matière organique, ainsi qu'en favorisant la biodiversité du sol (Brown et al., 2017). Comparativement à la monoculture qui fragilise la structure du sol à long terme, la rotation diversifiée des cultures permet de stabiliser la structure du sol, notamment grâce aux différents systèmes racinaires des cultures qui exploitent de façon différente les couches du profil du sol. Par exemple, les systèmes

racinaires des céréales et des plantes fourragères contribuent significativement à améliorer la structure du sol et à augmenter la teneur en matière organique du sol. (Carrier, 2005; Robert, 2008, novembre) L'ajout de légumineuses dans la rotation constitue une source renouvelable d'azote grâce à leur capacité à fixer l'azote de l'air, ce qui permet de diminuer les besoins en engrais azoté (N'Dayegamiye, Tremblay et Deschênes, 2013). Ainsi, en améliorant la santé et la fertilité du sol, une rotation des cultures bien planifiée contribue à renforcer la capacité du sol à s'adapter à des conditions météorologiques extrêmes, notamment en prévenant l'érosion et la perte de sols, de nutriments et de pesticides (Brown et al., 2017).

Aussi, la rotation des cultures est reconnue comme une stratégie très efficace pour la gestion des mauvaises herbes et pour réduire l'incidence des maladies et insectes ravageurs. (Lanoie et Vanasse, 2017) En effet, les rotations diversifiées, qui intègrent des cultures de différentes familles botaniques ayant des caractéristiques variées, entraînent du même coup une diversification des ennemis des cultures associés. L'alternance de ces cultures permet alors d'interrompre leur cycle de vie et de diminuer leur présence dans les champs. La diversification des banques de semences des mauvaises herbes conduit également à une persistance plus faible de chaque mauvaise herbe. (Agrobonsens, s. d.)

Par ailleurs, une rotation bien planifiée permet d'augmenter le rendement et la rentabilité de l'exploitation agricole en raison des multiples avantages qui en résulte. Par exemple, l'ajout du blé dans une rotation de maïs et de soya, génère des profits additionnels de plus de 290 \$/ha, notamment en raison d'une hausse du rendement jusqu'à 6 % pour le maïs et 14 % pour le soya. (Brown et al., 2017) En général, on peut s'attendre à une augmentation du rendement d'au moins 5 à 10 % en passant d'une monoculture à une rotation, toutes cultures confondues (Robert, 2008, novembre).

Enfin, la rotation des cultures est une pratique clé dans l'atténuation des CC (Meyer-Aurich et al., 2006; Delgado et al., 2011). En effet, cette pratique permet de réduire les émissions de N_2O en créant des conditions qui optimisent l'utilisation des engrais azotés et qui limitent leurs pertes (Camirand et Gingras, 2009). Dans une moindre mesure, la séquestration de CO_2 atmosphérique est augmentée en raison de rendements plus élevés. L'intégration de cultures pérennes dans la rotation permet aussi de séquestrer du CO_2 atmosphérique sur une plus longue période. Il a été démontré qu'une monoculture de maïs produit 60 % plus de N_2O que du maïs sur blé d'automne. (Robert, 2008, novembre) Similairement, une étude ontarienne s'échelonnant sur 20 ans a conclu que des rotations diversifiées incluant des légumineuses ont des rendements nets plus élevés et des émissions de GES beaucoup plus faibles que la

monoculture de maïs. Par exemple, la rotation maïs — maïs — soya — blé avec trèfle rouge sous-ensemencé s'est traduite par des rendements nets plus élevés de 100 \$/ha et une réduction des émissions GES de 1300 kg eCO₂/ha/année par rapport au maïs en continu. (Meyer-Aurich et al., 2006)

4.2 Agroforesterie

L'agroforesterie a été identifiée par plusieurs experts comme une pratique pouvant contribuer à l'adaptation et l'atténuation des CC, en plus d'apporter plusieurs services écosystémiques utiles aux agriculteurs et à la société en générale (Schoeneberger et al., 2012; Thevathasan et al., 2012; Anel et al., 2017; Delgado et al., 2011; Jacobs et al., 2019). Le CRAAQ a d'ailleurs récemment publié un document intitulé « L'agroforesterie au bénéfice du microclimat : Un atout face aux changements climatiques ». Ce document fait une synthèse vulgarisée des connaissances scientifiques actuelles et détaille le rôle des systèmes agroforestiers et leurs impacts sur le microclimat des terres agricoles dans le contexte des CC (CRAAQ, 2019). Aussi, le volet 4 du programme Prime-Vert offre un soutien financier aux projets sous le thème « Agroforesterie – adaptation aux changements climatiques ». Trois projets d'envergure ont reçu l'aide de ce programme et sont en cours de réalisation (MAPAQ, 2019d).

L'agroforesterie consiste à associer intentionnellement des arbres aux cultures principales afin que leur interaction procure certains bénéfices (AAC, 2020). Au Québec, les haies brise-vent et les bandes riveraines boisées (figure 4.3) sont les pratiques agroforestières les plus répandues dans le milieu agricole, entre autres parce qu'elles bénéficient de meilleurs incitatifs financiers que les autres systèmes agroforestiers (De Baets, Gariépy et Vézina, 2007; Laroche et Olivier, 2015). En effet, le dernier recensement de l'agriculture de Statistique Canada (2016) dénombrait un total de 5092 fermes qui avait adopté les haies brise-vent (naturels ou plantés), ce qui correspondait à environ 18 % des fermes du Québec (Statistique Canada, 2020b).

D'autres systèmes agroforestiers, comme les systèmes de cultures intercalaires ont aussi retenu l'attention des experts dans les dernières années pour leur potentiel d'adaptation et d'atténuation des CC. Même si cette pratique est encore méconnue et peu répandue à l'échelle de la province et du pays, la communauté scientifique explore de plus en plus cette avenue comme un outil intéressant dans contexte de CC (Peichl et al., 2006; Rivest et al., 2009; Rivest, 2010; Cogliastro, Kouchner et Bouttier, 2013, février; Alam et al., 2014; Anel et al., 2017; Lussier et Cogliastro, 2018).



Figure 4.3 Système agroforestier intégrant des haies brise-vent et bandes riveraines (tiré de : Schoeneberger et al., 2012, p. 2)

Puisque les haies brise-vent et les bandes riveraines agroforestières sont les mieux documentées pour l’adaptation et l’atténuation des CC, cette section se concentre seulement sur ces pratiques. Même si les autres formes d’agroforesterie, comme les systèmes de cultures intercalaires, ne sont pas détaillées dans cet essai, elles sont également des avenues intéressantes pour les agriculteurs québécois et elles valent la peine d’être explorées davantage.

4.2.1 Haies brise-vent

Comme le nom l’indique, les haies brise-vent sont des rangées d’arbres ou d’arbustes dont la principale fonction est de réduire les inconvénients occasionnés par le vent en atténuant sa force et sa vitesse. Ces barrières végétales permettent entre autres de réduire l’érosion éolienne des sols et de diminuer les dommages causés aux cultures, ce qui a un effet positif sur la productivité. (Brandle et al., 2009)

Les haies brise-vent permettent aussi de renforcer la résilience des cultures aux menaces climatiques et contribuent à l’adaptation aux CC de plusieurs façons. Par exemple, elles protègent les cultures qui poussent dans la zone abritée en créant un microclimat favorable, ce qui réduit grandement l’impact des événements météorologiques extrêmes comme les tempêtes de vent (Schoeneberger et al., 2012). Elles entraînent aussi une meilleure rétention et une distribution plus uniforme de la neige dans les champs. Une couverture de neige plus épaisse et uniforme offre une protection hivernale contre le gel supérieure (augmente la survie hivernale des cultures pérennes) et favorise une meilleure humidité du sol pour les cultures de l’année suivante. (Mize et al., 2008; Brandle, Hodges et Zhou, 2004) Les haies brise-vent contribuent également à augmenter la biodiversité en milieu agricole en fournissant un habitat et une source de nourriture à la faune et aux pollinisateurs. Elles peuvent même contribuer à la lutte intégrée

des ravageurs en hébergeant des insectes et des oiseaux qui sont leurs prédateurs naturels. (Brandle et al., 2004)

Tous ces avantages offerts par les brise-vent contribuent à augmenter le rendement des cultures dans la majorité des cas, malgré la perte d'espace cultivable et l'effet de compétition avec les cultures immédiatement adjacentes aux brise-vent (AAC, 2020). En effet, selon Brandle et al. (2009), les haies brise-vent qui occupent de 5 à 6 % du champ ont un effet net positif sur le rendement des cultures en tenant compte seulement de l'augmentation des rendements dans les zones protégées par le brise-vent. Par exemple, une disposition optimale des brise-vent pourrait augmenter les rendements nets de 7,6 % pour le maïs et de 9,2 % pour le soya. Toutefois, une étude récente réalisée au Québec a conclu que l'effet des brise-vent sur les rendements de maïs était négligeable dans la plupart des cas (Rivest et Vézina, 2015). D'autres études réalisées dans les prairies canadiennes et américaines ont démontré que des champs protégés par des brise-vent matures augmentent leur rendement moyen de 3,5 % pour le blé et jusqu'à 6,5 % pour la luzerne cultivée (AAC, 2020). La rentabilité de l'implantation de haies brise-vent en bordure de champ peut varier en fonction de plusieurs facteurs, comme le taux de croissance et la durée de vie totale du brise-vent. Le facteur le plus influant est la valeur des cultures protégées par les brise-vent, puisque les avantages économiques générés par l'augmentation des rendements sont plus élevés pour les cultures qui ont une valeur plus importante. (Olar et Boutin, 2014; Brandle et al., 2009) Au Québec, l'implantation de haies brise-vent est actuellement éligible à une aide financière gouvernementale couvrant de 70 à 90 % des coûts d'implantation et d'entretien (Agrobonsens, s. d.).

Enfin, la plantation d'arbres est un outil d'atténuation des CC très efficace puisqu'ils séquestrent le CO₂ atmosphérique dans leur biomasse et dans leurs racines. Par exemple, une haie brise-vent d'un kilomètre composée de peuplier à maturité aura séquestré au moins 106 tonnes de CO₂ (AAC, 2020). Dans une moindre mesure, cette pratique peut indirectement mener à une réduction des émissions de GES en raison de la réduction de la superficie en culture occupée par la haie, notamment en réduisant les passages de la machinerie (réduction de la consommation de combustibles fossiles), en réduisant l'application d'engrais azoté (réduction des émissions de N₂O). Il est toutefois important de mentionner que cette pratique doit être mise en œuvre de façon proactive puisque les bénéfices associés se concrétisent sur le long terme. (Schoeneberger et al., 2012; Thevathasan et al., 2012)

4.2.2 Bandes riveraines élargies et agroforestières

Une bande riveraine est une zone tampon végétalisée (herbacée, arbustive ou arborescente) entre un champ cultivé et un fossé ou un cours d'eau. Son rôle principal est de préserver la qualité de l'eau et la biodiversité en filtrant le ruissellement provenant des champs qui est chargé en contaminants (sédiments, engrais et pesticides). (Martineau, Boivin et Léger, 2013) Au Québec, la *Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables* (PPRLPI) du gouvernement provincial oblige les agriculteurs à conserver une bande de végétation d'une largeur minimale de 3 mètres à partir de la ligne des hautes eaux (LHE). Les municipalités ont également le pouvoir d'établir des normes plus strictes que celles de la Politique provinciale. (UPA, 2020b)

Les bandes riveraines aménagées de façon optimale procurent une multitude d'avantages qui contribuent à l'adaptation aux CC, comme la stabilisation des berges, la réduction du lessivage et de l'érosion, la protection contre les inondations, ainsi que la création d'habitats pour les insectes pollinisateurs et les ennemis naturels. Elles peuvent également augmenter le potentiel de rendement et diminuer les coûts de production en limitant les pertes de sols, de semences, de pesticides et d'engrais. L'élargissement des bandes riveraines de quelques mètres au-delà des dimensions règlementaires augmentera l'efficacité de ses fonctions. (Martineau et al., 2013; Agrobonsens, s. d.)

L'aménagement d'une bande riveraine agroforestière consiste à planter une haie d'arbres à l'intérieur de la bande. La présence d'arbres fournit des avantages supérieurs aux bandes riveraines strictement herbacées ou arbustives en ce qui concerne la stabilisation des berges, l'effet brise-vent, l'augmentation de la biodiversité et la protection contre les inondations. De plus, les bandes riveraines agroforestières ont un potentiel de séquestration du carbone beaucoup plus élevée, ce qui contribue significativement à l'atténuation des GES. (Vézina, Lebel et Rivest, 2009; Anel et al., 2017) Par contre, les coûts de l'implantation et de l'entretien de bandes riveraines boisées et le revenu moindre en raison de la perte d'espace cultivable rendent cette pratique difficilement rentable pour les agriculteurs (Vézina et al., 2009; Olar et Boutin, 2014).

Pour cette raison, les travaux d'aménagements de bandes riveraines élargies et agroforestières sont admissibles à différents programmes de subvention, dont le programme Prime-Vert Volet 1 — Aménagements agroenvironnementaux durables intégrant des arbres et des arbustes ou étant favorable à la biodiversité. Ce programme, en vigueur jusqu'en 2023, subventionne de 70 à 90 % des dépenses admissibles. D'autres programmes peuvent couvrir une portion des coûts associés, tels que le

Programme Mise en valeur de la biodiversité en milieu agricole de la Fondation de la faune du Québec et le Programme ALUS Montérégie de la Fédération de l'UPA de la Montérégie et ALUS Canada. Certaines municipalités, municipalités régionales de comté et certains organismes de bassins versants fournissent des arbres ou des arbustes à faible coût ou financent l'aménagement des berges. (Agrobonsens, s. d.; UPA, 2020a)

4.3 Gestion des ennemis des cultures

La pression exercée par les insectes ravageurs (connus et nouveaux), les mauvaises herbes et les agents pathogènes va augmenter avec le réchauffement climatique prévu à l'horizon 2050 (section 2.4). Cela pourrait mener à une pression à la hausse de l'utilisation des pesticides par les agriculteurs pour maintenir leur production (UPA, 2017). Or, le recours excessif aux pesticides engendre plusieurs problèmes, comme l'augmentation du risque de développement de résistance des ennemis des cultures à certains produits antiparasitaires, en plus des risques pour la santé et pour l'environnement (Hilliard et Reedyk, 2020; Nawaz et Ahmad, 2015). Il est donc primordial que les agriculteurs adoptent des méthodes alternatives de contrôle des ennemis des cultures qui assurent une résilience à long terme et qui s'inscrivent dans un contexte d'agriculture durable.

4.3.1 Lutte intégrée

La gestion intégrée des ennemis des cultures (ou lutte intégrée) est l'approche qui est mise de l'avant par les experts pour renforcer la résilience des productions (Brewer et al., 2018; Wolfe et al., 2014; Walthall et al., 2013; Howden et al., 2007). L'adoption de la lutte intégrée permet de mieux gérer les risques associés aux ennemis des cultures sans compromettre la durabilité des activités agricoles. D'ailleurs, l'objectif général de la *Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture 2011-2021* est d'accroître l'adoption de la gestion intégrée des ennemis des cultures pour diminuer l'utilisation de pesticides (Gouvernement du Québec, 2011).

D'après le gouvernement du Québec (2011), la lutte intégrée contre les ennemis des cultures est « une méthode décisionnelle qui consiste à avoir recours à toutes les techniques nécessaires pour réduire les populations d'organismes nuisibles de façon efficace et économique, dans le respect de la santé et de l'environnement. » Cette stratégie se décompose en cinq étapes : connaissance, prévention, suivi des champs, intervention et évaluation et rétroaction. La figure 4.4 illustre le schéma global de la lutte intégrée.

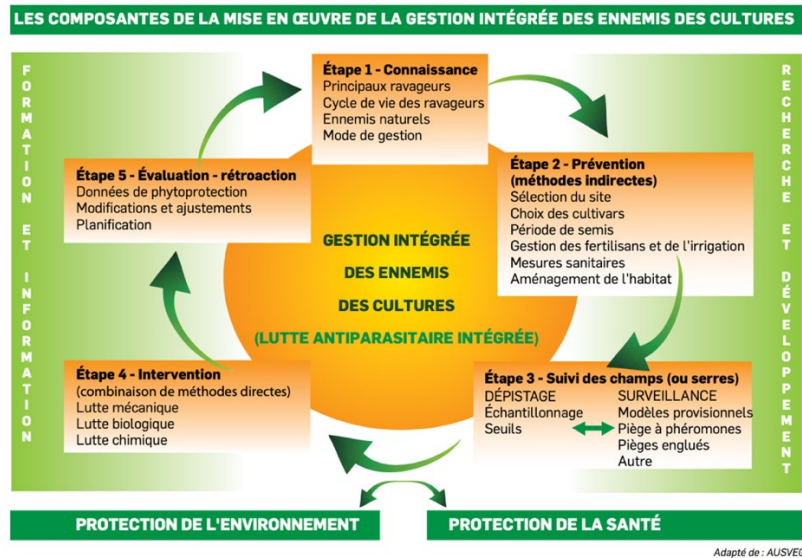


Figure 4.4 Composantes de la mise en œuvre de la lutte intégrée des ennemis des cultures (tiré de : Gouvernement du Québec, 2011, p. 7)

La première étape consiste à connaître les ennemis des cultures qui habitent l'agroécosystème. Elle permet notamment d'identifier les principaux ennemis des cultures et les nouvelles menaces, de comprendre les conditions qui leur permettent de se reproduire, de survivre et de se propager. Cette étape permet également d'identifier les ennemis naturels et les autres organismes bénéfiques. (ÉcoRessources, 2012; Adli, 2017; Agrobonsens, s. d.)

La deuxième étape implique de mettre en place un ensemble de pratiques qui permettent de prévenir l'apparition de dommages causés par les ennemis de cultures. Parmi ces pratiques, les cultures de couverture et intercalaires (section 4.1.1), la diversification et la rotation des cultures (section 4.1.4), ainsi que les haies brise-vent et les bandes riveraines (sections 4.3.1 et 4.3.2) contribuent à freiner la prolifération des ennemis de cultures et favorisent la biodiversité (ennemis naturels et pollinisateurs). Ces pratiques permettent entre autres d'adapter l'écosystème agricole afin de le rendre moins propice à l'établissement des organismes nuisibles et/ou favorable au développement des espèces utiles comme les ennemis naturels. D'autres méthodes, comme la sélection des parcelles appropriées à la culture, le choix de variétés de cultures résistantes aux ravageurs et aux agents pathogènes, la modification des densités et des dates de semis, l'usage raisonné des fertilisants, ainsi que la gestion du niveau d'humidité par le contrôle de l'irrigation, permettent de prévenir la prolifération des ennemis des cultures et de réduire l'utilisation de pesticides. (ÉcoRessources, 2012; Adli, 2017; Agrobonsens, s. d.)

Ensuite, le suivi des champs sert à déterminer si une application de pesticides est nécessaire. Cela est possible en utilisant un ensemble de pratiques qui permettent de suivre l'évolution des ennemis des cultures pendant toute la saison de culture. Cette étape consiste principalement à faire un dépistage régulier des ennemis des cultures dans les champs, à utiliser des techniques d'échantillonnage et à établir des seuils d'intervention. Le dépistage peut se faire simplement de façon visuelle en marchant dans le champ ou en utilisant des pièges tels que les pièges à phéromones ou englués (voir section 5.2.1). Cette technique permet de repérer et de compter les ennemis des cultures et leurs prédateurs naturels afin d'évaluer les populations présentes dans les champs. D'ailleurs, il existe des outils tels que IRIIS phytoprotection qui aident les agriculteurs à identifier les ennemis et les alliés des cultures qu'ils observent dans leurs champs. Aussi, le risque d'infestation varie en fonction des conditions climatiques et du stade de développement des cultures. Il faut donc prendre en compte ces deux éléments dans l'évaluation des risques. Toutes ces données recueillies au champ permettent alors de déterminer si la présence d'un ennemi pourrait causer des problèmes. Pour ce faire, l'utilisation de seuils d'intervention est primordiale en lutte intégrée. Il s'agit d'établir des seuils de tolérance des cultures aux ennemis des cultures au-delà desquels le risque de pertes économiques justifie l'utilisation de pesticides. Autrement dit, on tolère les dommages causés par les ennemis des cultures tant qu'ils n'excèdent pas le coût des interventions phytosanitaires. Il existe également des modèles prévisionnels qui peuvent servir d'outils d'aide à la décision, comme le Réseau d'avertissements phytosanitaires (RAP) et le Centre Informatique de Prévion des Ravageurs en Agriculture (CIPRA). (ÉcoRessources, 2012; Adli, 2017; Agrobonsens, s. d.)

Lorsque les données de dépistage, les seuils d'intervention ou les modèles prévisionnels indiquent qu'une intervention est nécessaire, l'agriculteur doit prioriser une combinaison de méthodes de luttes mécaniques (ou physiques), biologiques et chimiques. Selon le principe de la lutte intégrée, la lutte chimique (pesticides) n'est utilisée qu'en dernier recours. De nombreuses alternatives aux pesticides ont été développées dans les dernières années. Par exemple, des méthodes de lutte biologiques telles que les ennemis naturels, les mâles stériles et la confusion sexuelle peuvent être utilisées dans la plupart des cas. Dans le cas où aucune alternative aux pesticides n'est disponible, des outils comme SAgE Pesticides (<https://www.sagepesticides.qc.ca>) peuvent être utilisés afin de choisir les pesticides les moins nocifs pour la santé humaine et l'environnement. (ÉcoRessources, 2012; Adli, 2017; Agrobonsens, s. d.)

Enfin, la dernière étape consiste à évaluer l'efficacité des interventions qui ont été faites durant la saison. Cette rétroaction permet ainsi de mieux se préparer pour la saison suivante. À ce point, il est

aussi important de s'informer des avancées scientifiques et des nouvelles alternatives aux pesticides. (Adli, 2017; Agrobonsens, s. d.)

Au Québec, la lutte intégrée s'est développée dans les années 1980 et 1990, mais son adoption par les agriculteurs a stagné dans les dernières années. Un rapport d'ÉcoRessources (2012) a identifié plusieurs barrières à l'adoption des pratiques de lutte intégrée, comme le manque d'accompagnement adéquat pour appuyer les producteurs, la complexité technique des pratiques, les risques de perte financière et l'absence de bénéfices perçus par les producteurs. Il est difficile de mesurer de façon précise le niveau d'adoption de la lutte intégrée par les producteurs québécois puisque celle-ci réfère à un processus décisionnel global qui ne se limite pas seulement à l'adoption de pratiques culturales précises. Un sondage réalisé en 2008 par BPR-Infrastructure Inc. établissait toutefois à 51 % le nombre d'entreprises faisant de la lutte intégrée. Il y a eu d'autres tentatives d'estimations, mais les résultats varient considérablement d'une étude à l'autre. Malgré tout, ces estimations ont permis de faire ressortir une grande variabilité dans le taux d'adoption en fonction des types de productions (grandes cultures, maraîcher, petits fruits, etc.) (ÉcoRessources, 2012). Chose certaine, une adoption généralisée de la lutte intégrée est souhaitable dans un contexte de CC.

4.4 Gestion de l'eau

Les projections climatiques pour l'horizon 2050 montrent que le cycle hydrologique sera modifié et que certains risques liés à la gestion de l'eau seront exacerbés (section 2.2). L'augmentation des précipitations au printemps et à l'hiver, la diminution du couvert de neige, les redoux hivernaux et les cycles de gel-dégel plus fréquents, l'augmentation de la fréquence des pluies extrêmes, les étiages d'été plus sévères et plus longs, ainsi que l'allongement des périodes de sécheresse, sont autant de changements qui auront des impacts directs et indirects sur les productions végétales du Québec. Les agriculteurs devront donc améliorer leur gestion de l'eau pour atténuer les risques associés à ces changements, tels que la hausse du ruissellement de surface, les risques d'érosion plus importants en été comme en hiver, l'accroissement des risques de stress hydrique, l'augmentation des risques de mortalité hivernale des plantes, l'augmentation des risques d'inondations et les enjeux d'approvisionnement en eau d'irrigation.

Plusieurs mesures d'adaptation peuvent être adoptées au niveau de la ferme pour améliorer la gestion de l'eau. De façon générale, toutes les pratiques qui améliorent la santé et la structure des sols, la perméabilité du sol et la rétention de l'eau dans le sol permettront d'augmenter la résilience des

productions face à ces risques accrus. Par exemple, l'adoption de pratiques de conservation du sol, la réduction de la compaction et la diversification des rotations sont de bons points de départ (section 4.1). (Delmotte, 2019) D'autres pratiques comme les aménagements agroforestiers (section 4.3) peuvent également contribuer significativement à atténuer ces risques. En agriculture, l'amélioration de la gestion de l'eau signifie d'améliorer la productivité de l'eau et donc d'augmenter le rendement des cultures sans prélever davantage d'eau (Charron et al., 2019a). Pour ce faire, les agriculteurs doivent améliorer la gestion de l'irrigation en améliorant leurs systèmes d'irrigation, d'approvisionnement, de collecte et de stockage de l'eau (section 4.5.1). Ils doivent également optimiser la gestion de l'eau de surface en améliorant leurs aménagements hydroagricoles et leurs systèmes de drainage (section 4.5.2). (Michaud et al., 2012; Brewer et al., 2018)

4.4.1 Irrigation et approvisionnement en eau

Les impacts directs et indirects des CC vont probablement augmenter les besoins en eau pour les cultures actuellement irriguées, telles que les fruits et légumes, principalement en raison de la hausse de l'évapotranspiration des plantes. Il est aussi possible que certaines cultures qui ne sont pas présentement irriguées, comme les grandes cultures et les cultures fourragères, le deviennent éventuellement. Ce scénario est toutefois peu probable à court terme, puisque les investissements nécessaires pour l'acquisition et l'opération des systèmes d'irrigation se rentabilisent difficilement pour ce type de cultures. Malgré tout, un projet initié par Carl Boivin de l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) se penche sur la possibilité d'irriguer les plantes fourragères au Québec pour atténuer les risques associés aux périodes de sécheresse (IRDA, 2020; Parent, 2020, 1er septembre). Par ailleurs, les producteurs qui sont déjà équipés de tels systèmes pourraient être tentés d'irriguer l'ensemble de leurs cultures. Les autres usages de l'eau (résidentiel, industriel, commercial et institutionnel [ICI] et récréotouristique) augmenteront également à l'horizon 2050 du fait de la croissance attendue de la population et de son comportement de consommation. Cela pourrait mener à des conflits entre les différents usagers de la ressource à l'échelle locale dans certaines régions de la province comme la Montérégie et Lanaudière. (Charron et al., 2019a)

Le projet de recherche intitulé « Recherche participative d'Alternatives durables pour la gestion de l'eau en milieu agricole dans un contexte de changements climatiques (RADEAU) » est l'un des plus importants ouvrages québécois sur la gestion de l'eau en milieu agricole dans un contexte de CC. L'équipe du projet a ciblé les pistes d'adaptation en matière de gestion de l'eau en agriculture. Leur analyse a permis de cibler plusieurs technologies et approches innovantes (existantes et potentielles) qu'ils ont répertoriées

en 4 secteurs, soit les pratiques agronomiques, les technologies d'irrigation, les sources d'approvisionnements et les approches politiques et institutionnelles. (Charron et al., 2019a) La majorité des pistes d'adaptation des trois premières catégories sont applicables au niveau de la ferme pour la plupart des productions végétales. Celles-ci sont présentées à l'annexe 1.

Cet inventaire des technologies et des bonnes pratiques permet de constater qu'il est possible d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau en agriculture, car la majorité de celles-ci semblent peu utilisées pour l'instant. Même si des progrès ont été observés à ce niveau depuis quelques années, des mesures d'adaptation pour optimiser les équipements et la régie d'irrigation sont nécessaires pour augmenter la résilience des fermes à long terme. Bien que leur recherche ait permis de cibler des solutions de hautes technologies ou des solutions relativement complexes, comme la nanotechnologie, ce sont les solutions simples et les pratiques culturales bénéfiques qui se sont démarquées dans leur analyse. En effet, les solutions qui peuvent être facilement intégrées sans modifications majeures ont un fort potentiel d'adoption par les agriculteurs. (Charron et al., 2019a) Le tableau 4.4 présente les mesures d'adaptation de type agronomique pour améliorer la gestion de l'eau au niveau de la ferme (voir le tableau 1 de l'annexe 2 pour la liste complète).

Tableau 4.4 Mesures d'adaptation de type agronomique pour améliorer la gestion de l'eau au niveau de la ferme (tiré de : Charron et al., 2019a, p. 127)

TECHNOLOGIE/BONNE PRATIQUE	COURTE DESCRIPTION	NOTE
Pratiques culturales bénéfiques	Pratiques qui permettent de réduire les répercussions environnementales de l'agriculture dans son milieu, d'améliorer la capacité de rétention d'eau des sols et de réduire les besoins d'irrigation. <ul style="list-style-type: none"> ▪ Travail réduit du sol ou semis direct (voir section 4.1.2) ▪ Semis sous couvert végétal permanent (SCV) ▪ Culture de couverture (voir section 4.1.1) ▪ Haies brise-vent et bandes riveraines (voir section 4.3) ▪ Remédiation des milieux humides ▪ Culture sur billon 	Pour la majorité des productions végétales
Paillis biodégradables	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Paillis biodégradables et compostables à base d'amidon (bioplastique) ▪ Peuvent être installés avec les mêmes équipements qu'un paillis de plastique standard ▪ Augmente la productivité de l'eau 	Pour le secteur maraîcher
Technologies en appui à l'agriculture de précision	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Étroitement reliées à l'optimisation de la régie d'irrigation ▪ Utilisation des données recueillies sans contact (drones, GPS, satellites, capteurs spécialisés) ▪ Consolidation des données de fertigation, texture du sol, rendement, densité, température foliaire, etc. 	Détaillé au chapitre 5

L'irrigation est un moyen efficace d'accroître la résilience des productions, notamment en ce qui concerne les risques de déficit hydrique de plus en plus fréquents. Selon les données de Statistique Canada, environ 1560 fermes (5 % des fermes du Québec) étaient équipées d'un système d'irrigation en 2016, majoritairement dans les productions de fruits et légumes. Il s'agissait d'une augmentation de près de 25 % par rapport à 2011. (Statistique Canada, 2019)

Dans les cultures maraîchères et de petits fruits, le recours généralisé à l'irrigation pourrait devenir indispensable. Afin d'améliorer l'efficacité de l'irrigation, l'irrigation goutte à goutte est une piste de solution souvent évoquée pour améliorer l'efficacité de l'irrigation en horticulture (Michaud et al., 2012; Brewer et al., 2018; Ouranos, 2015; Charron al., 2019a). Une étude ontarienne sur l'adaptation aux CC pour la production du maïs évoque même la possibilité d'irriguer les champs de maïs avec des systèmes d'irrigation goutte à goutte (Morand et al., 2017). Ces systèmes sont très efficaces puisqu'ils fournissent de l'eau directement aux racines des plantes. Ils comportent aussi plusieurs avantages pour l'adaptation aux CC, comme la réduction du ruissellement de surface et de l'érosion du sol, la réduction des pertes d'eaux dues à l'évaporation, la diminution de la germination des mauvaises herbes et des risques de maladies (Morand et al., 2017; Charron et al., 2019a). Le tableau 2 de l'annexe 2 contient la liste complète des technologies d'irrigation recensées par Charron et al. (2019a).

En ce qui concerne l'approvisionnement en eau d'irrigation, des mesures qui permettent de sécuriser l'accès à une eau d'irrigation de qualité en quantité suffisante sont des pistes d'adaptation intéressantes. En effet, l'ajout d'infrastructures de stockage pour conserver et réutiliser davantage d'eau pour les moments de la saison ou un accès à l'eau est critique pourra être nécessaire. (Charron et al., 2019a; Delmotte, 2019) Par exemple, l'aménagement de bassins de rétention des eaux de pluie et de la fonte des neiges est une solution qui augmente la résilience de la production pour son approvisionnement en eau (Brewer et al., 2018; UPA, 2017). Le tableau 3 de l'annexe 2 montre la liste complète des mesures d'adaptation recensées par Charron et al. (2019a) liées aux sources d'approvisionnement en eau d'irrigation.

4.4.2 Ouvrages hydroagricoles et systèmes de drainage

Pour limiter les risques liés aux précipitations extrêmes, tels que l'érosion du sol et le lessivage, il sera important d'améliorer l'écoulement de l'eau dans le champ. Évidemment, les différentes pratiques de conservation des sols (section 4.1), qui augmentent la teneur en matière organique des sols et qui favorisent l'infiltration, aideront grandement à réduire ces risques. Toutefois, des mesures d'adaptation

supplémentaires pourraient être nécessaires pour gérer les excès d'eau. Ainsi, investir dans des systèmes de drainage (souterrain et de surface), des ouvrages hydroagricoles (avaloir, voie d'eau engazonnée, etc.) et le nivellement des champs, sont des solutions d'adaptation pertinentes pour limiter l'érosion et ralentir l'écoulement de l'eau. (Michaud et al., 2012; Brewer et al., 2018; Blondlot, 2019) Un drainage optimal pourrait également diminuer les émissions de CO₂ et de N₂O, puisqu'il permet de limiter la compaction et l'érosion du sol, et donc de réduire la perte de carbone organique et le lessivage d'engrais azoté (Jacobs et al., 2019).

Une étude par Michaud et al. (2013) a permis de mettre à jour les normes et les outils de conception des ouvrages hydroagricoles pour tenir compte des changements climatiques à venir. Cette étude a entre autres permis de mettre en évidence l'importance de considérer l'augmentation anticipée de la fréquence de redoux hivernaux (épisodes de fonte et de pluie hivernale) dans la conception de ces ouvrages. Similairement, l'augmentation attendue de l'intensité des précipitations estivales obligerait à augmenter les dimensions des ouvrages hydroagricoles (Michaud et al., 2012).

Par ailleurs, le drainage souterrain contrôlé (figure 4.5) a été ciblé comme une piste d'adaptation potentielle pour atténuer les effets négatifs des CC en grandes cultures (Michaud et al., 2012; Morand et al., 2017; Charron et al., 2019a). Toutefois, une récente étude au Québec et en Ontario a démontré les limites du drainage contrôlé en tant que mesure d'adaptation aux CC (Macrae et Michaud, 2018). En effet, les auteurs concluent que la faisabilité du drainage contrôlé pour limiter le rabattement de la nappe phréatique en climat futur est limitée, principalement en raison de l'augmentation anticipée des précipitations hivernales et printanières qui augmenteront les risques de ruissellement de surface. Cette conclusion s'applique toutefois seulement pour la fermeture manuelle des drains. Dans le cas où les drains sont ouverts et fermés suivant des hauteurs variables pour contrôler le niveau de la nappe selon la saison (gestion de l'eau de précision), le drainage contrôlé permettrait d'atténuer le stress hydrique sans augmenter les risques de ruissellement de surface. (Macrae et Michaud, 2018)

Bref, différentes options d'adaptation s'offrent aux agriculteurs pour atténuer les risques associés aux excès d'eau. La meilleure stratégie d'adaptation dépendra grandement du contexte unique à chaque ferme (Delmotte, 2019).

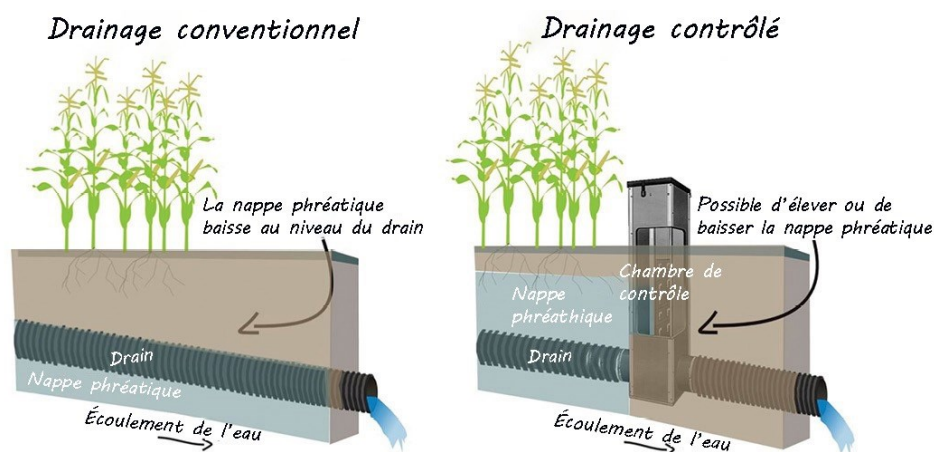


Figure 4.5 Système de drainage contrôlé (tiré de : Michaud et Macrae, 2018, p. 1)

4.5 Stratégies de gestion des cultures

Pour gérer efficacement les risques liés au climat, les agriculteurs devront être ouverts au changement (Brewer et al., 2018). Parmi les stratégies de gestion des cultures éprouvées pour l'adaptation aux CC, l'ajustement du calendrier des opérations des cultures, ainsi que la sélection de cultures et variétés adaptées sont celles qui sont le plus souvent mentionnées dans la littérature. Ces stratégies permettent également aux agriculteurs de tirer profit des opportunités créées par les CC.

4.5.1 Ajustement du calendrier des opérations

Les CC font en sorte que la saison de croissance des végétaux sera plus longue et plus chaude (section 2.1). Pour pallier ce changement, les agriculteurs peuvent ajuster les périodes de semis et de récoltes selon les conditions climatiques actuelles et projetées pour réduire les effets de la chaleur sur la production et éviter le stress thermique pendant les périodes critiques de développement de la plante (Pitesky et al., 2014; Wolfe et al., 2014). En effet, devancer progressivement les dates de semis et de récolte des cultures annuelles permettra d'éviter les conditions très arides de la fin de l'été (Warren et Lemmen, 2004). Des outils d'aide à la décision comme l'Atlas agroclimatique du Québec seront très utiles pour appuyer la mise en œuvre de cette stratégie d'adaptation (Lepage et al., 2012a). Cette stratégie pourrait augmenter les rendements, ce qui aurait pour effet direct d'augmenter la séquestration du carbone dans le sol (atténuation) et la quantité de résidus de récolte (Jacobs et al., 2019).

Aussi, les CC affectent le cycle hydrologique et les précipitations tombent davantage sous forme de pluies orageuses et localisées (section 2.2). Les agriculteurs qui cultivent en zones inondables pourraient

décaler les dates de plantation pour éviter les conditions propices aux inondations au printemps (Wolfe et al., 2014). Enfin, pour les cultures fourragères, une stratégie d'adaptation efficace serait de devancer les dates de coupes. Cela permettrait de profiter d'une coupe additionnelle et donc de maintenir ou d'augmenter le rendement. (Bélanger, 2016; Jégo et al., 2020)

4.5.2 Cultures et variétés adaptées

L'utilisation de cultures et de variétés plus tolérantes aux divers stress climatiques, comme les sécheresses, les inondations, les températures élevées et les ennemis des cultures, est l'une des options d'adaptation les plus souvent évoquées pour la majorité des cultures (Loboguerrero et al., 2018; Cameron, 2014). En effet, un agriculteur peut choisir des variétés de cultures en fonction des dates de maturité et de la génétique pour correspondre à la longueur de la saison de croissance prévue, aux précipitations et à la sécheresse, ainsi qu'aux différents ravageurs et maladies (Brewer et al., 2018).

Pour l'instant, les agriculteurs peuvent utiliser des variétés qui sont présentement cultivées plus au sud où le cumul de chaleur (degrés-jours) est plus important afin de tirer profit de l'allongement de la saison de croissance (Lepage et al., 2012a; Porter et al., 2014). Le coût pour la mise en œuvre de cette solution d'adaptation dépendra du prix de la semence des cultures ou variétés, ainsi que de la nécessité ou non d'investir en raison de changements structurels importants, comme l'achat de nouvelles machines agricoles (Jacobs et al., 2019).

Des variétés adaptées aux différents stress climatiques, notamment la tolérance accrue à la chaleur, sont déjà disponibles pour certaines espèces. Toutefois, les efforts sont présentement concentrés sur les cultures plus importantes comme le maïs et le blé, tandis que les cultures de fruits et légumes reçoivent moins d'attention pour l'instant. Cela peut aussi s'expliquer par le fait que la sélection génétique des cultures fruitières vivaces implique un plus long processus que les cultures annuelles. Aussi, le changement de variétés n'est pas toujours une option facile ou peu coûteuse, même pour les cultures annuelles. Les nouvelles variétés doivent non seulement être adaptées au nouveau climat, mais aussi aux types de sols et aux pratiques agricoles, en plus de répondre aux préférences du marché local pour la couleur, la taille, la saveur et d'autres facteurs de qualité. (Wolfe et al., 2018)

Par ailleurs, les avancées en génie génétique sont une occasion d'accélérer le développement de variétés/cultivars/hybrides améliorées qui sont plus tolérants aux différents stress biotiques et abiotiques (Wolfe et al., 2018). Au Québec, des efforts de recherche dans ce domaine sont déjà en cours.

Par exemple, les chercheurs du projet SoyaGen utilisent la génomique pour développer des variétés de soya améliorées qui atteignent la maturité et produisent des semences plus rapidement et qui sont plus résistantes aux ravageurs et aux maladies. À terme, l'objectif de ce projet est de développer des variétés de soya à haut rendement qui correspondent aux conditions canadiennes actuelles et futures (SoyaGen, s. d.). Similairement, des chercheurs à l'Île-du-Prince-Édouard développent de nouvelles variétés de pommes de terre qui résisteront mieux aux conditions climatiques extrêmes exacerbées par les CC, comme les sécheresses, les précipitations extrêmes et les froids anormaux (Radio-Canada, 2019, 30 août).

4.6 Synthèse des pratiques d'adaptation

Le tableau 4.5 présente une synthèse des pratiques d'adaptation détaillées dans ce chapitre en fonction de leurs avantages liés à l'adaptation et à l'atténuation des CC, leurs avantages environnementaux et les facteurs économiques.

Tableau 4.5 Synthèse des pratiques d'adaptation

		Avantages liés à l'adaptation						Atténuation		Avantages environnementaux		Subventions disponibles
		Amélioration de la santé et de la fertilité des sols	Diminution des risques de stress thermique (températures extrêmes)	Diminution des risques de stress hydriques (sécheresses)	Diminution des risques d'érosion et de lessivage (vents et précipitations extrêmes)	Amélioration de la gestion des ennemis des cultures	Profite des opportunités créées par les CC	Séquestration carbone	Réduction des émissions GES (CO ₂ et N ₂ O)	Favorise la biodiversité	Diminution de la pollution diffuse (qualité de l'eau)	
4.1 Pratiques de conservation des sols et mesures préventives	4.1.1 Cultures de couverture	✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓ Prime-Vert Volet 1 : Pratiques et ouvrages de conservation des sols
	4.1.3 Travail réduit du sol et semis direct	✓		✓	✓		✓	✓	✓		✓	
	4.1.2 Réduction de la compaction	✓			✓				✓			
	4.1.4 Diversification et rotation	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
4.2 Agroforesterie	4.2.1 Haies brise-vent				✓	✓		✓		✓		✓ Prime-Vert Volet 1 : Aménagements agroenvironnementaux durables intégrant des arbres et des arbustes ou étant favorable à la biodiversité
	4.2.2 Bandes riveraines élargies et agroforestières				✓	✓		✓		✓	✓	
4.3 Gestion des ennemis des cultures	4.3.1 Lutte intégrée					✓				✓	✓	✓ Prime-Vert Volet 1 : Équipements et pratiques visant la réduction des risques liés aux pesticides
4.4 Gestion de l'eau	4.4.1 Irrigation et approvisionnement en eau		✓	✓								✓ Prime-Vert Volet 1 : Équipements de gestion optimale de l'eau d'irrigation
	4.4.2 Ouvrages hydroagricoles et systèmes de drainage			✓	✓				✓			
4.5 Stratégie de gestion des cultures	4.5.1 Ajustement du calendrier des opérations		✓				✓	✓				
	4.5.2 Cultures et variétés adaptées		✓	✓		✓	✓	✓				

En somme, ce chapitre a permis de dresser un inventaire de mesures d'adaptation bien documentées. Les différents acteurs du milieu agricole pourront intégrer ces informations dans leurs prises de décision en fonction du contexte unique à chaque ferme. Comme point de départ, les pratiques de conservations du sol (cultures de couverture, évitement de la compaction du sol, travail réduit du sol et semis direct, rotations diversifiées) s'avèrent être des mesures d'adaptation « sans regret » qui se traduisent par une grande variété d'avantages et qui comportent peu de risques financiers. Aussi, les agriculteurs peuvent profiter des subventions disponibles pour adopter la plupart des pratiques identifiées dans ce chapitre.

5. LES TECHNOLOGIES D'AGRICULTURE DE PRÉCISION AU SERVICE DE L'ADAPTATION

L'agriculture de précision (AP) fait référence à l'utilisation d'un ensemble de technologies (système de positionnement GPS [*Global Positioning System*], système d'information géographique [SIG], imagerie satellitaire, drones, capteurs connectés, etc.) afin de mieux gérer la variabilité spatiale et temporelle des paramètres agricoles d'un champ et d'optimiser l'application des intrants (eau, engrais, pesticides, carburant, etc.) (Jacobs et al., 2019). Basée sur le concept de produire plus avec moins, l'AP pourrait ainsi faire partie de la solution pour répondre à l'augmentation de la demande alimentaire mondiale, tout en participant à accélérer la transition du modèle agricole conventionnel vers un modèle agricole durable (Bucci, Bentivoglio et Finco, 2018; Aubert, Schroeder et Grimaudo, 2012).

Les technologies d'agriculture de précision (TAP) répondent à divers besoins des agriculteurs et peuvent servir d'outils dans la démarche d'adaptation aux CC de ceux-ci, tout en offrant plusieurs autres avantages comme l'amélioration de la rentabilité économique et la diminution de l'empreinte environnementale des activités agricoles. C'est pour cette raison que plusieurs experts ont ciblé le concept d'agriculture de précision comme une avenue d'adaptation potentielle pour certaines exploitations agricoles (Delgado et al., 2011; Janowiak et al., 2016; Jacobs et al., 2019; Brewer et al., 2018). Ainsi, l'objectif de ce chapitre est de montrer comment les TAP peuvent être mises à profit dans l'adaptation des pratiques agricoles.

Les TAP peuvent être classées en trois catégories qui couvrent presque toutes les pratiques agricoles, soit les technologies de guidage, les technologies de mesures et les technologies de réaction (figure 5.1). Les technologies de guidage incluent les outils technologiques qui guident les tracteurs et autres machineries dans un champ. Celles-ci comprennent toutes les formes de systèmes de guidage, telles que l'assistance à la conduite, l'autoguidage et l'agriculture à circulation contrôlée (ACC). Les technologies de mesures regroupent tous les capteurs qui permettent de collecter des données spatiales afin de produire des cartes des différents paramètres des sols (topographique et pédologique), des rendements, de l'humidité du sol et du couvert végétal des cultures. La conversion des données collectées en informations utiles à la prise de décision permet alors à l'agriculteur d'intervenir de façon précise en utilisant les technologies de réaction. Les technologies de réaction permettent d'optimiser l'application des intrants (eau, fertilisants, pesticides, semences, etc.) en fonction des besoins spécifiques à l'intérieur d'un champ, ainsi que pour le désherbage physique de précision. (Soto et al., 2019)

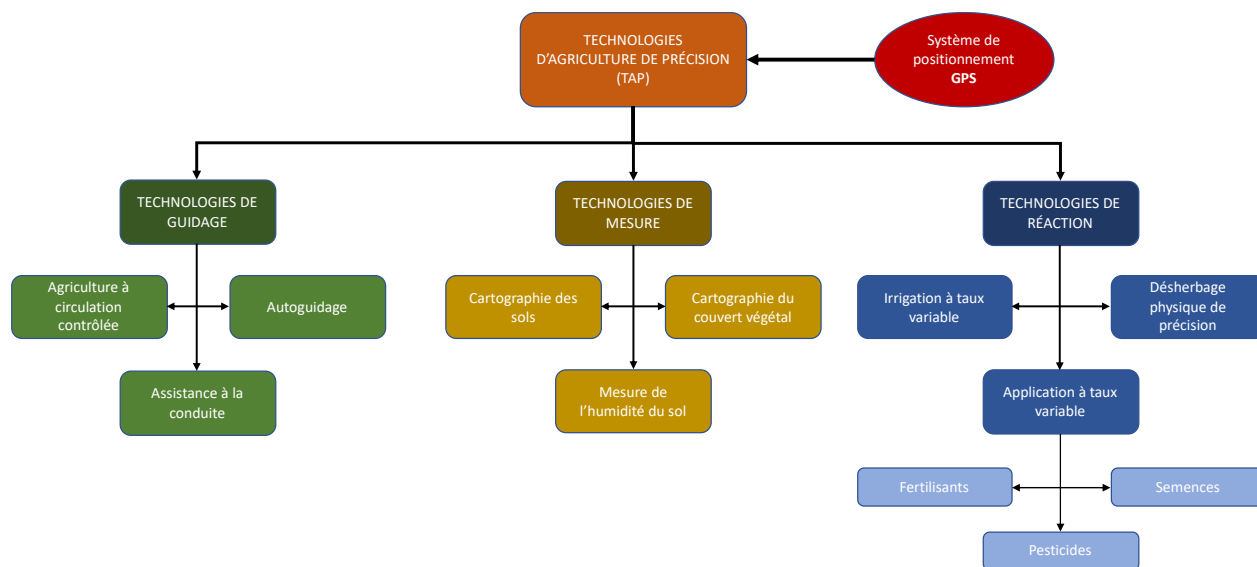


Figure 5.1 Aperçu des technologies d’agriculture de précision (inspiré de : Soto et al., 2019, p. 15)

Les sections suivantes détaillent les principales applications des TAP qui ont le potentiel de contribuer à augmenter la résilience des productions végétales, soit les technologies de guidage, les technologies pour améliorer la lutte intégrée (drones, capteurs de spores et pièges automatisés, désherbage mécanique de précision), l’irrigation à taux variable et l’application de fertilisants à taux variable. Il ne s’agit pas d’une liste exhaustive, mais plutôt d’exemples d’utilisation des TAP au profit de l’adaptation.

5.1 Technologies de guidage

Les machineries agricoles sont de plus en plus équipées de systèmes de positionnement GPS et de systèmes de guidage. Il existe une multitude de combinaison de ces systèmes sur le marché avec des niveaux de précision différents (CRAAQ, 2015; Lizotte, Beaulieu et Legaré, 2018). Ils peuvent être utilisés pour la plupart des opérations dans le champ, telles que le semis, le travail du sol, l’application de fertilisants, la récolte, etc. Les technologies de guidage ont été développées en deux systèmes distincts, soit l’assistance à la conduite et l’autoguidage.

5.1.1 Assistance à la conduite et autoguidage

Les systèmes d’assistance à la conduite aident l’opérateur du véhicule agricole à garder le cap en l’informant à l’aide de voyant lumineux (*lightbar* ou barre de guidage) d’une erreur de trajectoire afin que ce dernier la corrige manuellement. Les systèmes d’autoguidage sont entièrement intégrés aux véhicules et maintiennent automatiquement la trajectoire prédéfinie avec un niveau de précision élevé,

sans que l'opérateur ait besoin de conduire. Étant donné sa plus grande précision, les avantages des systèmes d'autoguidage sont plus marqués que les systèmes d'assistance à la conduite. Par contre, l'investissement nécessaire est plus important, notamment pour l'acquisition d'un système de correction RTK (*Real-Time Kinematic*) dont la précision atteint environ 2,5 cm (Lizotte et al., 2018). De façon générale, les coûts d'acquisition et d'opération augmentent en fonction de la précision des systèmes (CRAAQ, 2015). Selon le dernier recensement de l'agriculture (2016), près de 4700 fermes (17 %) utilisaient la technologie GPS et plus de 2000 (7 %) fermes utilisaient l'autoguidage pour leurs opérations (Statistique Canada, 2018b; Boudreau, 2018).

Les avantages des systèmes de guidage sont multiples. Principalement, ils permettent d'augmenter l'efficacité globale des opérations culturales en réduisant notamment le chevauchement des applications d'intrants (semences, fertilisants, pesticides, etc.). Cela se traduit par des économies de carburant, de temps et d'intrants, ce qui entraîne une réduction des coûts associés, ainsi qu'une diminution de la fatigue de l'opérateur. Par exemple, une étude américaine rapporte des économies de temps et de carburant d'environ 6 % pour les agriculteurs utilisant des systèmes d'assistance à la conduite et d'environ 11 % pour les systèmes d'autoguidage (Bora, Nowatzki, et Roberts, 2012). De même, la diminution de la consommation de carburant et d'engrais contribue à réduire les émissions de GES. Par exemple, l'étude de Tremblay et al. (2013) rapporte une diminution de la consommation de carburant, et donc d'émissions GES, variant de 8 à 14 % pour les opérations de semis et de travail du sol. Enfin, la plus grande précision des passages de la machinerie dans les voies de circulation permet de minimiser la compaction du sol (voir section 4.1.3). Cela constitue le principal avantage des systèmes de guidage par GPS en ce qui concerne l'adaptation aux CC des pratiques agricoles. (Tremblay et al., 2013; Soto et al., 2019) Afin de maximiser les avantages des technologies de guidage, les agriculteurs peuvent prendre la voie de l'agriculture à circulation contrôlée.

5.1.2 Agriculture à circulation contrôlée

L'ACC est un système qui restreint le passage de la machinerie à la zone la plus petite possible en établissant des voies de circulation permanentes. Normalement, les différentes largeurs de la machinerie et des voies de circulation font en sorte que les agriculteurs circulent de façon aléatoire dans le champ, ce qui peut mener à un roulement sur près de 85 % de la superficie cultivée. L'objectif principal de l'ACC est donc de limiter le risque de compaction du sol au plus petit pourcentage de surface du champ possible. Pour ce faire, toutes les machines doivent avoir une largeur de travail et de roulement identique (ou modulable), ce qui nécessite la plupart du temps d'adapter les machines agricoles ou

même de les remplacer. (Antille et al., 2015) Aussi, pour obtenir des résultats optimaux, l'ACC nécessite d'utiliser un système de positionnement précis (p. ex. correction RTK) combiné à un système d'autoguidage. Par contre, Lizotte et al. (2018) affirment que l'utilisation d'un système GPS avec une correction moins précise, mais gratuite, de type WAAS (*Wide Area Augmentation System*) permettrait d'implanter l'ACC au Québec à plus grande échelle en raison de la plus grande simplicité du système et des coûts d'investissement et d'opération plus faibles. Ils estiment que l'investissement nécessaire pour la conversion à l'ACC pourrait varier entre 131 000 \$ et 178 000 \$.

L'évitement de la compaction du sol permet entre autres de préserver sa structure et d'améliorer ses fonctions comme l'infiltration et la rétention d'eau, ainsi que d'augmenter la séquestration de carbone dans le sol (McHugh, Tullberg et Freebairn, 2009). Aussi, les différents bénéfices de l'ACC, tels que l'amélioration de la structure et de l'aération du sol et la réduction de la consommation de carburant, mènent à des réductions importantes des émissions de GES. Par exemple, Antille et al. (2015) mentionne qu'une réduction des émissions de N₂O de 20 à 50 % par rapport à la circulation aléatoire est possible avec l'ACC. L'adoption de l'ACC peut également mener à des gains économiques significatifs. Premièrement, l'augmentation de l'efficacité des opérations culturales permet de réduire les coûts associés (main d'œuvre, intrants, carburants). Deuxièmement, l'amélioration des propriétés physiques du sol dans les zones sans circulation de la machinerie peut conduire à des rendements plus élevés dans ces zones. Lizotte et al. (2018) estiment que des gains de rendement moyens de 8 % sur 200 ha permettraient de rentabiliser un investissement de 200 000 \$ sur 10 ans.

Par ailleurs, l'implantation de l'ACC pourrait faciliter l'adoption des pratiques agricoles de conservation, pour lesquelles la compaction du sol est souvent une contrainte. En effet, la combinaison de l'ACC et des pratiques de conservation, telles que le travail réduit du sol, le semis direct, la rotation des cultures et les cultures de couverture de légumineuses, pourrait amplifier les effets bénéfiques de ces pratiques et mener à des rendements plus élevés, une réduction de l'application d'engrais azotés, une diminution de la consommation de carburant, une réduction des émissions de GES (CO₂ et N₂O), ainsi qu'une diminution des besoins en eau des cultures en raison d'une meilleure rétention d'eau dans le sol et un meilleur enracinement. (Soto et al., 2019)

Bref, l'adoption généralisée de l'ACC pourrait potentiellement accroître la résilience des fermes face aux événements climatiques extrêmes (sécheresse et précipitations intenses), en plus de contribuer à l'atténuation des CC et d'augmenter leur productivité (McPhee, 2009). Il s'agit donc d'une avenue

intéressante pour l'adaptation aux CC des fermes du Québec, notamment pour les fermes de grandes cultures et maraîchères.

5.2 Technologies pour améliorer la lutte intégrée

Les différentes technologies de mesure permettent de surveiller l'état des cultures tout au long de la saison de croissance. Ces technologies ont le potentiel d'aider les agriculteurs à s'adapter à la plus forte pression des ennemis des cultures en améliorant la surveillance phytosanitaire et en servant d'outils d'aide à la décision dans un contexte de gestion intégrée des ennemis des cultures (voir section 4.4.1). Parmi ces outils technologiques, les drones, les pièges à insectes automatisés et les capteurs de spores sont prometteurs pour identifier et évaluer les risques phytosanitaires. Par ailleurs, les technologies de désherbage mécanique de précision peuvent aider à améliorer l'efficacité des méthodes de lutte physique contre les mauvaises herbes.

5.2.1 Drones

Il y a un engouement important pour l'utilisation de drones en agriculture depuis quelques années. En effet, les drones y trouvent de plus en plus d'applications, notamment pour la télédétection en agriculture de précision. (CRAAQ, 2015) Comparativement à l'imagerie satellitaire, les drones offrent la possibilité d'acquérir des images aériennes de très haute résolution pour la surveillance des cultures et la cartographie des champs. Il s'agit donc d'un outil intéressant pour faciliter le dépistage des ennemis des cultures dans les champs de grande superficie. Toutefois, les cartes générées par ces données doivent, la plupart du temps, être interprétées par un agronome et l'agriculteur pourra appliquer les recommandations de celui-ci. (Lizotte, 2019) Les drones peuvent aussi être utilisés pour l'échantillonnage, l'introduction d'ennemis naturels pour la lutte biologique, ou encore l'application de traitements phytosanitaires. Bien que quelques compagnies spécialisées offrent déjà des services commerciaux pour l'agriculture (DroneXperts, Novadrone, Canopée, Drone des champs, etc.), cette technologie est encore au stade de recherche et développement au Québec. Il y a encore plusieurs barrières à l'utilisation à grande échelle des drones, comme la nécessité d'obtenir des autorisations gouvernementales, le contexte réglementaire contraignant, les besoins d'expertises en pilotage et en traitement géomatique, les coûts élevés, leur fragilité aux vents, etc. Cependant, les développements dans ce domaine progressent très rapidement et les drones deviendront de plus en plus accessibles aux agriculteurs. (Boucher, Gagnon et Chouinard, 2017)

Quelques projets de recherche sur l'utilisation de drones pour le dépistage ont été réalisés au Québec, ou sont en cours de réalisation. Par exemple, le projet du chercheur Jérôme Théau de l'Université de Sherbrooke, en collaboration avec le Consortium Prisme, a permis de démontrer qu'il était possible de détecter la présence de zones de stress (maladies, insectes ravageurs, problème de croissance) dans une culture de la pomme de terre grâce à la production de cartes de dépistage provenant d'images acquises par drones (figure 5.2). Cet outil vient donc appuyer les méthodes actuelles de dépistage en permettant d'identifier et de réagir plus rapidement aux problèmes, et donc de réduire les pertes liées aux maladies et insectes ravageurs. Cette technologie pourrait aussi être adaptée à d'autres types de cultures, comme les cultures maraîchères et la viticulture. (Théau et al., 2014; Gavelle, 2015)

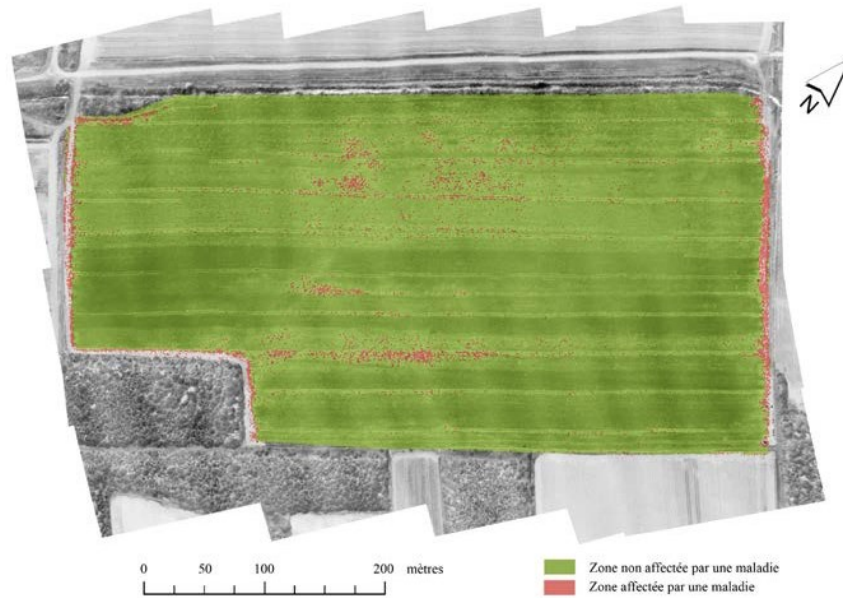


Figure 5.2 Exemple de carte de dépistage mettant en évidence les zones affectées par une maladie dans un champ de pommes de terre (tiré de : Théau et al., 2014, p. 2)

Similairement, l'équipe du Dr Karem Chokmani de l'INRS combine l'imagerie par drone et la vision artificielle (intelligence artificielle) pour faire le dépistage automatique de larves de doryphore dans la culture de la pomme de terre. L'objectif du projet est d'être en mesure de fournir une carte d'infestation du champ quelques heures après l'avoir survolé. Les producteurs pourront donc utiliser cet outil pour optimiser l'utilisation d'insecticides en appliquant la bonne quantité, aux bons moments et aux bons endroits. Cela permettrait de réduire les coûts de lutte antiparasitaire, d'augmenter les rendements et de limiter les impacts environnementaux liés à l'usage des pesticides. (Lhissou et al., 2018; Le Bulletin des agriculteurs, 2020)

Enfin, un autre projet en cours orchestré par Vincent Myrand du Carrefour Industriel et Expérimental de Lanaudière (CIEL) vise à développer un outil de surveillance du doryphore de la pomme de terre à l'aide d'imagerie de télédétection acquise par un drone. Ce projet permettra entre autres de démontrer si cet outil de dépistage permet réellement de rationaliser l'utilisation des insecticides envers le doryphore de la pomme de terre. (MAPAQ, 2018a; Firlej et Saguez, 2019)

Même si les drones sont de plus en plus populaires auprès des agriculteurs et que leur utilisation pour le dépistage est prometteuse, il y a encore beaucoup de travail à faire pour que cette technique soit utilisée à grande échelle au Québec. (Roullé, 2019) À l'heure actuelle, l'imagerie aérienne permet d'identifier les zones du champ où il y a des dommages, mais un dépistage au champ est tout de même nécessaire pour en confirmer la cause. L'avantage du drone est qu'il permet d'avoir une vue d'ensemble du champ, ce qui permet à l'agriculteur de traiter seulement les foyers d'infestation. Toutefois, une main d'œuvre spécialisée en géomatique et en agronomie est essentielle pour la production et l'interprétation des cartes. (Boucher et al., 2017)

Par ailleurs, il est également possible d'utiliser les drones pour l'introduction d'ennemis naturels en lutte biologique. Un récent projet réalisé par Chaussé et al. (2018) a testé l'utilisation de drones pour effectuer des lâchers de trichogrammes, des microguêpes qui parasitent les œufs de la pyrale du maïs, pour lutter contre cet insecte ravageur dans le maïs sucré de transformation. Cette innovation vient donc grandement faciliter les opérations de lutte biologique et contribue à améliorer la lutte intégrée. (Chaussé et al., 2018; Canopée, 2020)

Évidemment, les drones ne sont pas seulement utilisés dans un contexte de lutte intégrée. L'imagerie aérienne par drones peut servir à évaluer de nombreux autres paramètres des cultures, tels que le rendement et la biomasse, les besoins en éléments nutritifs, les stress hydriques et les propriétés du sol (Zhang et Kovacs, 2012; Boucher et al., 2017). Par exemple, des chercheurs d'AAC pratiquent l'agriculture de précision sur une ferme maraîchère expérimentale en Montérégie en se servant notamment de drones, d'imagerie satellite et d'intelligence artificielle. Leur objectif est donc de caractériser la variabilité spatiale de chaque parcelle pour moduler l'application des intrants selon les besoins précis des plantes. Cette agriculture de précision permettrait donc d'augmenter la productivité de la ferme, mais surtout de réduire les impacts environnementaux de l'agriculture comme les émissions de N_2O qui découlent de la surutilisation d'engrais azotés. (Boutros, 2019, 31 juillet)

5.2.2 Pièges automatisés et capteurs de spores

Les capteurs connectés qui permettent d’obtenir à distance des informations sur certains ravageurs des cultures peuvent être d’une grande utilité dans un contexte de lutte intégrée. Les pièges automatisés et les capteurs de spores aident les agriculteurs à améliorer le dépistage, à mieux évaluer les risques et à réagir avant qu’une infestation ne survienne. Ce ne sont pas des technologies typiquement associées à l’AP, mais ces outils intègrent des technologies innovantes comme l’internet des objets et l’intelligence artificielle pour améliorer leur efficacité. (Firlej et Saguez, 2019; Boucher et al., 2017)

L’utilisation de pièges (à phéromones ou englués) est déjà une pratique courante pour le dépistage des insectes ravageurs. L’avantage des pièges automatisés (ou connectés) est qu’ils envoient des photos du contenu via un réseau cellulaire afin de faire le décompte à distance des insectes capturés. En théorie, les bénéfices de cette technologie pour le milieu agricole (producteurs, conseillers, chercheurs, etc.) sont multiples. Ces capteurs permettent d’augmenter la précision de la surveillance phytosanitaire à moindre coût, de diminuer le nombre de visites sur le terrain, de mieux cibler les moments d’applications d’agents de lutte biologique ou de pesticides et de simplifier le partage des données de dépistage entre les différents intervenants. (Boucher et al., 2017) Quelques compagnies (Trapview, Semio, Spensa, etc.) ont commercialisé différents modèles de pièges automatisés. Plusieurs projets sont en cours au Québec pour évaluer leur efficacité pour le suivi de différents ravageurs, comme les projets de la compagnie Phytodata Inc. (2018 – 2021) (MAPAQ, s. d.c), du Carrefour industriel et expérimental de Lanaudière (CIEL) (2018 – 2020) (MAPAQ, s. d.b) et de l’Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) (2018 – 2021) (IRDA, s. d.).

Le capteur de spores est un appareil électronique qui permet de mesurer la quantité de spores dans l’air et donc d’anticiper les risques pathogènes ou fongiques avant que des symptômes de maladie n’apparaissent sur les plantes. Les échantillons récoltés par les capteurs doivent cependant être analysés dans un laboratoire spécialisé afin d’identifier le type et le nombre de spores. La présence de spores dans un capteur ne justifie pas nécessairement l’application d’un fongicide. Les résultats obtenus par un capteur doivent être jumelés à un modèle prévisionnel de la maladie et aux conditions météorologiques pour déterminer s’il est nécessaire d’appliquer un traitement, ainsi que le meilleur moment pour le faire. Il est aussi important de bien connaître le seuil d’intervention, les périodes de vulnérabilité de la plante et le cycle infectieux de la maladie. L’utilisation des capteurs et l’interprétation des résultats sont donc des outils d’aide à la prise de décision pour adopter une stratégie de lutte contre une maladie qui comporte le moins d’applications de fongicides possible. Au Québec, cette technologie a déjà été utilisée

avec succès dans la culture de l'oignon et de la pomme de terre. Cette méthode est maintenant disponible pour les cultures de framboises, de fraises, de laitues, de crucifères, de pommes de terre, de vignes et de blé. (AAC, 2017; Laplante El Haïli, 2017, 5 juillet; PRISME, s. d.) À ce sujet, un projet de la compagnie de recherche Phytodata (consortium PRISME), qui a débuté en 2016, visait à faciliter l'utilisation des capteurs de spores pour d'autres cultures, ainsi qu'à acquérir les connaissances manquantes nécessaires à la standardisation de l'utilisation des capteurs de spores dans un contexte de changements climatiques. (Fédération québécoise des producteurs de fruits et légumes de transformation [FQPFLT], s. d.; MAPAQ, 2016)

Ces technologies sont surtout utilisées dans un contexte de réseau de surveillance phytosanitaire, mais elles peuvent également être utilisées à l'échelle d'une exploitation agricole de très grande superficie. Elles sont difficilement rentables pour de plus petits producteurs. (Boucher et al., 2017)

5.2.3 Désherbage mécanique de précision

Le désherbage mécanique (ou sarclage) est une technique qui est utilisée comme alternative à la lutte chimique (herbicides) contre les mauvaises herbes. Cependant, la nécessité de désherber le plus près possible du rang pour que l'opération soit efficace demande un niveau de précision très élevé. Il est pratiquement impossible pour un opérateur de ce type de machinerie d'effectuer cette opération manuellement sans endommager la culture. (Desperrier-Roux et Weill, 2020) Les différentes technologies d'AP, telles que les systèmes de guidage (section 5.1) et plusieurs autres technologies récentes, rendent maintenant possible le désherbage mécanique avec le niveau de précision requis. Ces technologies contribuent également à ce que le désherbage mécanique devienne une alternative de plus en plus rentable par rapport à l'application d'herbicides. Parmi les solutions technologiques qui sont actuellement disponibles, l'autoguidage du tracteur par signaux GPS/RTK, les systèmes de guidage par caméra du sarcler, les sarclers intelligents et les robots désherbeurs autonomes sont les plus prometteurs. (Leblanc, 2017)

Des systèmes d'autoguidage existent actuellement pour le tracteur (autoguidage RTK – section 5.1) et pour l'équipement de désherbage (sarcler). Le système GPS avec correction RTK permet de guider automatiquement le tracteur en ligne droite de façon très précise (± 5 cm) (Desperrier-Roux et Weill, 2020). Les systèmes de guidage par caméra du sarcler permettent d'obtenir davantage de précision pour l'opération de désherbage mécanique. La caméra installée sur le sarcler distingue la culture du sol et le système ajuste automatiquement la trajectoire afin de l'aligner sur le rang. (Leblanc, 2017) Ces deux

systèmes peuvent être utilisés indépendamment, mais la combinaison des deux permet de faire un désherbage mécanique de grande précision et la qualité de vie de l'opérateur est améliorée (fatigue réduite). Le niveau d'expérience requis pour opérer la machinerie équipée des deux systèmes d'autoguidage est également beaucoup moins élevé. Évidemment, les coûts d'acquisition et d'entretien des deux systèmes sont plus grands. L'acquisition d'un système de guidage du tracteur devrait normalement être prioritaire par rapport à celui du sarcler, puisqu'il peut être utilisé pour plusieurs autres opérations culturales. (Desperrier-Roux et Weill, 2020)

Par ailleurs, des sarclers intelligents sont maintenant disponibles sur le marché (IC-Weeder, Robovator, Robocrop InRow, Remoweed). Ces sarclers sont encore plus efficaces puisqu'ils sont en mesure d'éliminer les mauvaises herbes entre les rangs et entre les plants d'une culture. En effet, les caméras ou les capteurs infrarouges installés sur le sarcler permettent de distinguer la culture des mauvaises herbes. Toutes les unités de sarclage sont indépendantes et contrôlées individuellement grâce à un microprocesseur. Ces équipements de haute technologie permettent au producteur de réduire au minimum le besoin en main d'œuvre pour les opérations de désherbage. Ils permettent aussi de réduire significativement l'application d'herbicides. (Leblanc, 2017)

Enfin, la robotisation des sarclers se développe très rapidement. Quelques compagnies européennes (Naïo Technologies, CARRÉ, Elatec) ont récemment commercialisé des robots qui accomplissent automatiquement certaines tâches de désherbage mécanique. Ils se déplacent et effectuent leurs interventions de sarclage de façon autonome grâce à l'intégration de différents capteurs et de l'analyse de donnée en temps réel. Ils se basent entre autres sur la couleur, la dimension et la position des plantes pour déterminer s'il s'agit de la culture ou d'une mauvaise herbe. Cet outil de haute technologie pourrait être une solution à la rareté de la main d'œuvre dans le milieu agricole pour ce type d'opérations culturales. (Leblanc et Lefebvre, 2020)

Le choix de l'agriculteur parmi les différentes options de désherbage mécanique de précision devrait être adapté à sa situation en fonction de son niveau de production, de la rareté de la main d'œuvre, de l'acceptabilité sociale des pratiques agricoles envisagées, de l'impact environnemental, etc. Il est également important de s'assurer que cette pratique n'affecte pas la santé des sols (érosion, perte de matière organique, dégradation de la structure du sol) en raison d'un travail du sol trop intense. Pour que le désherbage mécanique contribue réellement à l'adaptation, il doit être associé à des pratiques de conservation des sols, comme la rotation des cultures avec des engrais verts et à l'utilisation

d'amendements organiques, afin de maintenir ou augmenter la teneur en matière organique du sol. Il est important de comprendre que le désherbage mécanique doit être utilisé comme un moyen de lutte alternatif contre les mauvaises herbes dans une optique de lutte intégrée. (Leblanc et Lefebvre, 2020)

5.3 Irrigation à taux variable

Les différents systèmes d'irrigation à taux variable (ou irrigation de précision) qui augmentent l'efficacité de l'irrigation pourraient contribuer positivement à l'adaptation des cultures irriguées, notamment en diminuant les risques de stress hydriques et en diminuant la consommation d'eau globale. Une irrigation plus efficace peut aussi améliorer les rendements et la qualité de la production. La plupart des systèmes d'irrigation actuels appliquent de l'eau uniformément dans le champ. Cependant, des variations substantielles des propriétés du sol et de la disponibilité de l'eau existent dans la plupart des champs. Les technologies d'irrigation à taux variable permettent d'appliquer l'eau selon les besoins réels des plantes et de faire un meilleur usage des ressources en eau. (Soto et al., 2019)

Pour connaître les besoins réels des plantes, il faut utiliser des technologies de mesure qui permettent de cartographier le taux d'humidité du sol du champ, comme la télédétection (images satellites ou drones) ou des capteurs d'humidité du sol. Le taux d'application est optimisé en fonction de ces mesures afin de tenir compte de la variabilité des besoins à l'intérieur d'un champ. L'ajout d'un système de contrôle pour l'irrigation à taux variable aux systèmes d'irrigation uniforme est possible, mais cela peut représenter un investissement élevé et des coûts d'entretien. (Soto et al., 2019; Jacobs et al., 2019)

De plus, il est important de s'assurer que les gains d'efficacité de l'irrigation au niveau d'une exploitation agricole ne mènent pas à une expansion du réseau d'irrigation d'une production, ou encore que cela encourage les agricultures à passer à des cultures à haute valeur commerciale, mais plus gourmande en eau. Dans ce cas, il n'y aurait aucune économie d'eau ou même potentiellement une plus grande consommation d'eau, ce qui mènerait à la maladaptation. (Jacobs et al., 2019)

Par ailleurs, un projet québécois piloté par Gestion AgriA, un organisme à but non lucratif fondé par trois partenaires (Hortau, les fermes Tri-Jardins et la ferme Houblon des Jarrets Noirs), a reçu d'importantes subventions (total de près de 13 M\$) pour développer un système de gestion de l'irrigation basé sur l'intelligence artificielle qui permet de suivre en temps réel, sur son téléphone intelligent ou portable, les principaux facteurs de stress des cultures, comme la sécheresse, le manque de nutriments, la présence d'insectes, les vagues de froid ou de chaleur et les maladies fongiques et bactériennes. Les capteurs de

tension du sol développés par Hortau sont utilisés comme base du système. L'objectif du projet est donc d'assurer un rendement optimal des cultures tout en réduisant la consommation d'intrants (eau, énergie, fertilisants, pesticides) et en limitant la perte de nutriments. De plus, l'automatisation du système permettra de réduire considérablement le passage de la machinerie dans les champs, ce qui limite la compaction des sols et réduit les émissions de GES (CO₂). Puisqu'un sol compacté accroît les pertes d'azote par ruissellement et par dénitrification de l'azote, la pollution des cours d'eau et les émissions de N₂O seront également réduites. La diminution de la consommation d'énergie nécessaire pour le pompage de l'eau d'irrigation entraîne aussi une réduction des GES. Enfin, ce système permettra aussi aux agriculteurs de passer moins de temps dans les champs, ce qui constitue un avantage important considérant la pénurie de main d'œuvre. Le projet se terminera en mars 2022. (Cournoyer, 2020, 27 juillet)

5.4 Application de fertilisants à taux variable

La pratique conventionnelle est d'appliquer une dose uniforme de fertilisants dans un champ, ce qui mène souvent à une surutilisation. Une portion des surplus qui ne sont pas absorbés par les plantes se retrouvent donc dans l'environnement (Mousseau, 2018). Puisque, les CC augmenteront les risques de ruissellement de surface et d'érosion des sols pouvant contaminer les eaux de surface par le transfert d'éléments nutritifs, les mesures d'adaptation qui permettent de réduire la quantité totale d'éléments nutritifs appliquée dans un champ pourraient atténuer ces risques.

Avec les technologies d'application à taux variable (ATV), l'agriculteur peut appliquer différentes doses d'engrais chimiques ou d'engrais de ferme (fumier) à l'intérieur d'un champ selon une carte de prescription prédéterminée. Il est possible que l'opérateur modifie manuellement la dose à appliquer, mais cette TAP réfère plutôt au réglage automatique de la dose grâce à un système de positionnement GPS et un ordinateur de bord. Cette technologie s'appuie sur le constat qu'une variabilité considérable des besoins en éléments nutritifs à l'intérieur d'un champ peut découler des différences du sol (taux de matière organique, texture, etc.) et de la topographie (égouttement). Toutefois, tous les champs ne présentent pas une variabilité assez importante pour justifier l'utilisation de l'ATV. Cette technologie impose un certain risque financier en raison des coûts pour l'achat de l'équipement d'épandage et les besoins de collecte et d'analyse des données. Il est donc important de bien caractériser la variabilité du champ au préalable afin de s'assurer que l'ATV réduira réellement la quantité totale d'apports d'éléments nutritifs. (AAC, 2020a) Si c'est le cas, l'ATV peut représenter des bénéfices économiques

puisqu'elle mènera à une réduction des coûts d'éléments nutritifs et une augmentation potentielle des revenus en raison de meilleurs rendements (Tremblay et Michaud, 2014; Soto et al., 2019).

Par ailleurs, puisque les engrais (surtout les engrais azotés) sont les intrants les plus influents sur les émissions de GES à la ferme, cette technologie peut permettre d'éviter des émissions de GES, dans la mesure où elle permet de réduire la quantité totale appliquée. En effet, tous les engrais chimiques contribuent aux émissions de GES en libérant du CO₂ lors de leur production et leur transport. Les engrais à base d'azote contribuent de façon encore plus importante puisque leur application entraîne des émissions de N₂O. (Soto et al., 2019) Au Québec, l'utilisation des engrais azotés est en hausse et les émissions de N₂O découlant de la gestion des sols agricoles ont augmenté de 21 % entre 1990 et 2017 (MELCC, 2019). L'ATV d'engrais azotés pourrait donc contribuer à réduire davantage les émissions de N₂O à la ferme.

L'outil SCAN (pour Sol, Culture, Atmosphère et N – symbole de l'azote), développé par Nicolas Tremblay d'AAC, est un système d'aide à la décision disponible au Québec depuis 2017 pour les producteurs de maïs. Cet outil d'AP, basé sur des algorithmes d'intelligence artificielle, détermine la dose optimale de fertilisation azotée en fonction de multiples facteurs, comme les données de propriétés du sol, de météo, d'historique du champ et de paramètres économiques. Puisque plusieurs de ces facteurs sont variables à l'intérieur d'un champ, le modèle SCAN peut générer une carte d'application d'azote à taux variable afin d'obtenir une utilisation optimale de l'azote (figure 5.3). (AAC, 2017a; Mousseau, 2018; Boucher et al., 2017)

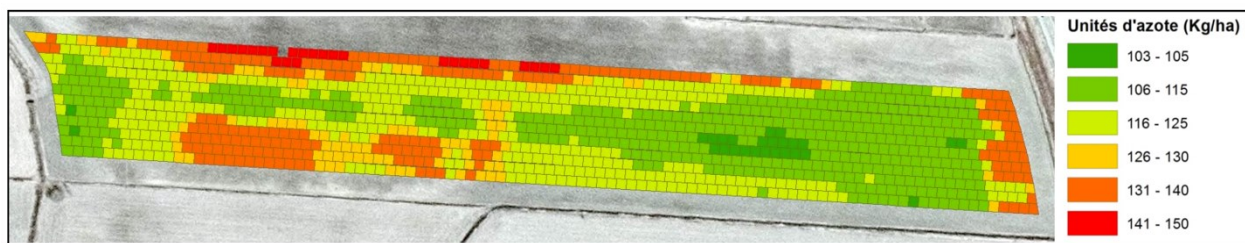


Figure 5.3 Exemple de carte d'application d'azote à taux variable issue du modèle SCAN (tiré de : Mousseau, 2018, p. 2)

5.5 Synthèse des technologies d'agriculture de précision

Le tableau 5.1 présente une synthèse de la contribution potentielle à l'adaptation et l'atténuation des CC et les cobénéfices possibles associés à l'utilisation des différentes TAP.

Tableau 5.1 Synthèse du rôle des TAP dans la lutte aux changements climatiques

TECHNOLOGIES D'AGRICULTURE DE PRÉCISION (TAP)	CONTRIBUTION À L'ADAPTATION	CONTRIBUTION À L'ATTÉNUATION	COBÉNÉFICES POSSIBLE
5.1 Système de guidage et agriculture à circulation contrôlée	<ul style="list-style-type: none"> – Réduction de la compaction – Pourrait faciliter l'adoption des pratiques agricoles de conservation 	Réduction des émissions de CO ₂ (carburant) et de N ₂ O (réduction de la compaction)	Gains économiques : <ul style="list-style-type: none"> – Augmentation de l'efficacité des opérations culturales permet de réduire les coûts associés (main d'œuvre, intrants, carburants) – Augmentation du rendement
5.2.1 Drones	<ul style="list-style-type: none"> – Amélioration du dépistage – Pourrait faciliter certaines techniques de lutte biologique (p. ex. lâchers de trichogramme) 	Non documenté	Réduction de l'utilisation de pesticides
5.2.2 Capteurs de spores et pièges automatisés	Amélioration du dépistage	Non documenté	Réduction de l'utilisation de pesticides
5.2.3 Désherbage mécanique de précision	Amélioration de l'efficacité de la lutte mécanique contre les mauvaises herbes	Non documenté	Réduction de l'utilisation d'herbicides
5.3 Irrigation de précision	<ul style="list-style-type: none"> – Réduction des risques de stress hydriques – Augmentation de l'efficacité de l'irrigation 	<ul style="list-style-type: none"> – Diminution de la consommation d'énergie pour le pompage de l'eau – Évite la saturation en eau du sol qui provoque la dénitrification de l'azote (émissions de N₂O) 	Amélioration des rendements et de la qualité des productions
5.4 Application de fertilisants à taux variable	Réduction du lessivage d'éléments nutritifs	Réduction des émissions de N ₂ O pour les engrais azotés et de CO ₂ pour la production et le transport de ces engrais.	<ul style="list-style-type: none"> – Réduction des coûts d'intrants – Amélioration des rendements – Réduction de la pollution des cours d'eau

Ce chapitre montre comment les TAP peuvent soutenir l'adaptation des pratiques agricoles et rendre les fermes plus résilientes aux impacts des CC. Par ailleurs, bien que ces technologies puissent être rentables en améliorant la productivité des fermes, il est important de mentionner que le coût élevé de l'investissement initial est un facteur qui en limite l'adoption à grande échelle. La population agricole vieillissante et le manque de relève peuvent également être des facteurs qui découragent l'investissement dans des solutions de haute technologie. Enfin, le besoin d'expertise pour utiliser efficacement ces technologies peut créer une dépendance à des services externes, ce qui pourrait mener à la maladaptation de certaines exploitations agricoles. (CRAAQ, 2015)

CONCLUSION

Alors que la compréhension scientifique des effets et des conséquences des CC s'améliore, le secteur agricole cherche des moyens de transposer ces informations en actions concrètes pour atténuer les risques climatiques et assurer la durabilité des fermes. Ainsi, cet essai visait à identifier et à analyser les pratiques et les technologies qui contribuent à l'adaptation aux CC des productions végétales du Québec. Pour y arriver, une revue de littérature a d'abord permis de définir les impacts actuels et futurs des CC sur ces productions. Il en ressort que les agriculteurs pourront profiter de certains changements, comme la hausse de la concentration atmosphérique de CO₂ et une saison de croissance plus chaude et plus longue, afin d'augmenter le potentiel de rendement de leurs cultures. Par contre, les CC auront aussi pour effet d'exacerber certains facteurs de risques, tels que la pression des ennemis des cultures et l'intensité et la fréquence des conditions climatiques extrêmes, qui peuvent mener à des pertes de récolte considérables. Ces risques accrus pourraient contrebalancer les effets positifs sur le rendement et empêcher les agriculteurs québécois d'en tirer profit. Il est donc essentiel que l'adaptation à cette nouvelle réalité devienne une priorité et que tous les acteurs du milieu agricole s'engagent dans cette voie. Il est également primordial que les mesures d'adaptation et d'atténuation des GES soient considérées simultanément afin de profiter du potentiel de synergie entre ces deux avenues (Smith et Olesen, 2010).

Le chapitre 4 a permis d'identifier un ensemble de pratiques agricoles qui sont reconnues pour augmenter la résilience des productions végétales face aux perturbations climatiques, en plus de réduire l'empreinte environnementale globale et d'améliorer la rentabilité des exploitations. Parmi celles-ci, les pratiques qui permettent de conserver les sols et d'améliorer leur santé (cultures de couverture, évitement de la compaction du sol, travail réduit et le semis direct, diversification et rotation des cultures) jouent un rôle crucial pour l'adaptation à la ferme. L'agroforesterie (haies brise-vent, bandes riveraines agroforestières, etc.) a également été ciblée comme une avenue intéressante au Québec dans un contexte de CC. En ce qui concerne la gestion des ennemis des cultures, une adoption généralisée de la lutte intégrée est souhaitable pour réduire au minimum l'utilisation de pesticides. Aussi, la gestion de l'eau devra être optimisée pour faire face aux différents aléas climatiques (sécheresses, précipitations extrêmes, inondations). Les agriculteurs ont intérêt à améliorer l'efficacité de leurs systèmes d'irrigation (p. ex. irrigation goutte à goutte) et d'approvisionnement en eau (p. ex. augmenter la capacité de stockage de l'eau) pour limiter les risques de stress hydriques, tout en réduisant la consommation d'eau globale. Il sera également pertinent de mettre en place ou d'améliorer les ouvrages hydroagricoles et les

systèmes de drainage afin de mieux gérer les excès d'eau dans les champs. Enfin, les agriculteurs devront modifier leurs habitudes pour tirer profit des opportunités créées par les CC. Parmi les stratégies de gestion des cultures éprouvées pour l'adaptation aux CC, l'ajustement du calendrier des opérations des cultures et la sélection de cultures et de variétés adaptées aux nouvelles conditions sont celles qui sont le plus souvent mentionnées dans la littérature.

Le chapitre 5 a montré comment certaines technologies d'agriculture de précision peuvent être mises à profit dans l'adaptation des pratiques agricoles. Il a aussi permis de mettre en évidence les innovations dans ce domaine. Certaines technologies, telles que les systèmes d'autoguidage de la machinerie, l'agriculture à circulation contrôlée, l'irrigation de précision et l'application de fertilisants à taux variable, peuvent contribuer à l'adaptation, en plus de réduire les émissions de GES et d'engendrer des bénéfices économiques et agronomiques. D'autres technologies, telles que les drones, les capteurs de spores et les pièges automatisés, ont le potentiel d'aider les agriculteurs à s'adapter à la plus forte pression des ennemis des cultures en améliorant les méthodes de lutte intégrée. Le désherbage mécanique de précision s'avère également une option intéressante pour faciliter la lutte mécanique contre les mauvaises herbes. Par contre, il est important de garder en tête que l'agriculture du Québec est très diversifiée et que ce ne sont pas toutes les exploitations agricoles qui ont les moyens financiers d'investir dans de telles technologies.

Le renforcement de la résilience contre les menaces liées au climat nécessitera une planification et un examen minutieux des opérations agricoles et de l'ensemble de l'entreprise. L'élaboration d'un plan d'adaptation pour identifier les risques et les pratiques pour y remédier est un bon point de départ. Les agriculteurs disposent déjà d'un certain nombre d'outils d'aide à la décision pour les appuyer dans leur démarche d'adaptation (Atlas agroclimatique du Québec, RAP, CIPRA, etc.). Il y a également des incitatifs économiques pour soutenir la mise en œuvre de mesures d'adaptation concrètes (p. ex. Programme Prive-Vert – Volet 1). Cependant, ces outils sont trop spécifiques et dispersés. Il y a un besoin de rassembler toutes les connaissances dans un même outil qui permettrait aux agriculteurs de prioriser les actions à entreprendre en ayant une vision plus globale et éclairée des enjeux d'adaptation et des solutions à leur disposition. De même, la démarche d'adaptation des producteurs devrait être soutenue par des conseillers formés sur les enjeux des CC. Des initiatives comme le projet Agriclimat sont essentielles pour stimuler le développement et le transfert des connaissances sur ces enjeux.

Somme toute, la question de l'autonomie alimentaire du Québec qui refait surface dans le contexte actuel de la pandémie de coronavirus vient renforcer l'importance de maintenir la productivité des fermes et de préserver la santé économique et les emplois du secteur agricole à travers la province (David, 2020, 18 avril). Cette problématique s'impose comme un motif supplémentaire pour accélérer la transition vers une agriculture plus durable et résiliente face aux CC. Cette transition doit être soutenue par l'ensemble de la société, de l'agriculteur au consommateur.

RÉFÉRENCES

- Adli, M. (2017, septembre 28). *La lutte intégrée, une méthode à considérer*. MAPAQ. Repéré à https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Regions/monteregie/articles/agroenvironnement/Pages/Lutte_integree_methode_a_considerer.aspx
- Agriclimat. (s. d.). *Agriclimat : Des fermes adaptées pour le futur*. Repéré à <https://agriclimat.ca/>
- Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC). (2014). *Élaboration d'un outil Web d'aide à la décision sur les cultures de couverture pour les producteurs de l'Est du Canada*. Repéré à https://www.agrireseau.net/documents/Document_88924.PDF
- Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC). (2017a). *SCAN, un outil d'agriculture de précision pour optimiser la gestion de l'azote aux champs*. Repéré à https://www.agrireseau.net/grandescultures/documents/95522/scan-un-outil-d_agriculture-de-precision-pour-optimiser-la-gestion-de-l_azote-aux-champs
- Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC). (2017b). *Les capteurs de spores : Une innovation qui sert toujours la production maraîchère*. Repéré à <https://www.agrireseau.net/documents/95651/les-capteurs-de-spores-une-innovation-qui-sert-toujours-la-production-maraichere?a=1etr=spore>
- Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC). (2020a, janvier 31). *L'application à taux variable d'éléments nutritifs : Est-ce que je peux l'envisager pour ma ferme?* Repéré à <https://www.agr.gc.ca/fra/agriculture-et-climat/pratiques-agricoles/sol-et-terre/elements-nutritifs-du-sol/l-application-a-taux-variable-d-elements-nutritifs-est-ce-que-je-peux-l-envisager-pour-ma-ferme-/?id=1368026127650>
- Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC). (2020b). *Les avantages de l'agroforesterie*. Repéré à <https://www.agr.gc.ca/fra/agriculture-et-climat/pratiques-agricoles/agroforesterie/les-avantages-de-l-agroforesterie/?id=1344633257343>
- Agrobonsens. (s. d.). *Les techniques*. Repéré à <http://agrobonsens.com/techniques/>
- Alam, M., Olivier, A., Paquette, A., Dupras, J., Revéret, J.-P., et Messier, C. (2014). A general framework for the quantification and valuation of ecosystem services of tree-based intercropping systems. *Agroforestry systems*, 88(4), 679-691.
- Al-Kaisi, M. (2016, septembre 19). How to Minimize Soil Compaction During Harvest. *Integrated Crop Management (ICM) News*. Repéré à <https://crops.extension.iastate.edu/cropnews/2016/09/how-minimize-soil-compaction-during-harvest>
- Al-Kaisi, M. (2019, novembre 5). Corn Residue Breakdown as Affected by Tillage and N Application. *Integrated Crop Management (ICM) News*. Repéré à <https://crops.extension.iastate.edu/cropnews/2019/11/corn-residue-breakdown-affected-tillage-and-n-application>

- Al-Kaisi, M., et Kwaw-Mensah, D. (2020). Quantifying soil carbon change in a long-term tillage and crop rotation study across Iowa landscapes. *Soil Science Society of America Journal*, 84(1), 182-202. <https://doi.org/10.1002/saj2.20003>
- Anel, B., Cogliastro, A., Olivier, A., et Rivest, D. (2017). *Une agroforesterie pour le Québec. Document de réflexion et d'orientation*. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire (CRAAQ). Repéré à https://giraf.fsaa.ulaval.ca/une_agroforesterie_pour_le_Quebec.pdf
- Antille, D. L., Chamen, W. C., Tullberg, J. N., et Lal, R. (2015). The potential of controlled traffic farming to mitigate greenhouse gas emissions and enhance carbon sequestration in arable land : A critical review. *Transactions of the ASABE*, 58(3), 707-731.
- Asseng, S., Ewert, F., Martre, P., Rötter, R. P., Lobell, D. B., Cammarano, D., Kimball, B. A., Ottman, M. J., Wall, G. W., White, J. W., Reynolds, M. P., Alderman, P. D., Prasad, P. V. V., Aggarwal, P. K., Anothai, J., Basso, B., Biernath, C., Challinor, A. J., De Sanctis, G., ... Zhu, Y. (2015). Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature Climate Change*, 5(2), 143-147. <https://doi.org/10.1038/nclimate2470>
- Atlas agroclimatique du Québec. (2012). *Agrométéo Québec*. Repéré à <http://www.agrometeo.org/atlas/>
- Aubert, B. A., Schroeder, A., et Grimaudo, J. (2012). IT as enabler of sustainable farming : An empirical analysis of farmers' adoption decision of precision agriculture technology. *Decision Support Systems*, 54(1), 510-520. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2012.07.002>
- Audet, M.-A. (2012). *Utilisation des cultures de couverture dans le maïs-ensilage pour contrer l'érosion des sols : Semis de ray-grass intercalaire en post-levée et semis de seigle d'automne à la dérobée en post-récolte*. Réseau Agriconseils de l'Estrie. Repéré à https://www.agrireseau.net/grandescultures/documents/83579/utilisation-des-cultures-de-couverture-dans-le-mais-ensilage-pour-contrer-l_erosion-des-sols-semis-de-ray-grass-intercalaire-en-post-leeve-et-semis-de
- Ball Coelho, B. (2011). *Production maraîchère : Utilisation des cultures de couverture pour la lutte intégrée contre les mauvaises herbes*. Agriculture et Agroalimentaire Canada. Repéré à https://www.agrireseau.net/agriculturebiologique/documents/Phytoprot_durable_cultures_couverture.pdf
- Bélanger, G. (2016). *Défis et opportunités des changements climatiques pour les fermes laitières du Québec*. Repéré à https://www.agrireseau.net/documents/Document_96512.pdf
- Bélanger, G., et Bootsma, A. (2003). *Impacts des changements climatiques sur l'agriculture au Québec*. Repéré à <https://www.agrireseau.net/agroenvironnement/documents/Belanger.pdf>
- Belzile, L., Patry, A., Charles, A., et Vanasse, A. (2018). *Évaluation de la rentabilité des cultures de couverture à l'échelle de l'entreprise agricole*. IRDA. Repéré à https://irda.blob.core.windows.net/media/5411/belzile-et-al-2018-evaluation_de_la_rentabilite_des_cultures_a_lechelle_de_lentreprise_agricole_rapport.pdf

- Bertrand, A., Tremblay, G., Pelletier, S., Castonguay, Y., et Bélanger, G. (2008). Yield and nutritive value of timothy as affected by temperature, photoperiod and time of harvest. *Grass and forage science*, 63(4), 421-432.
- Blondlot, A. (2018, 30 avril). Pourquoi se préoccuper des effets de l'évolution du climat en agriculture? *La Terre de Chez Nous*. Repéré à <https://www.laterre.ca/du-secteur/formation/se-preoccuper-effets-de-levolution-climat-agriculture>
- Blondlot, A. (2019, 7 février). *Changements climatiques et agriculture au Québec : Se préparer pour s'adapter*. Journées INPACQ 2019, Centre-du-Québec, Drummondville, Qc. Repéré à https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Regions/CentreduQuebec/INPACQ2019/Conferences-Grandescultures/Conference_Anne_Blondlot.pdf
- Bootsma, A., Anderson, D., et Gameda, S. (2004). *Impacts potentiels du changement climatique sur les indices agroclimatiques dans les régions du sud de l'Ontario et du Québec*. Repéré à https://www.agrireseau.net/agroenvironnement/documents/bootsma_on_qc_ind.pdf
- Bootsma, A., Gameda, S., et McKenney, D. (2005). Potential impacts of climate change on corn, soybeans and barley yields in Atlantic Canada. *Canadian journal of soil science*, 85(2), 345-357.
- Bora, G. C., Nowatzki, J. F., et Roberts, D. C. (2012). Energy savings by adopting precision agriculture in rural USA. *Energy, Sustainability and Society*, 2(1), 1-5.
- Boucher, A. C., Gagnon, A., et Chouinard, G. (2017). *Analyse des approches et des technologies novatrices en termes de surveillance phytosanitaire dans les grandes cultures et les cultures horticoles au Québec*. Repéré à https://www.agrireseau.net/documents/Document_95783.pdf
- Boudreau, Y. (2018). L'adoption de technologies de pointe en agriculture. *BioClips*, 26(6), 2. Repéré à https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Bioclips/BioClips2018/Volume_26_no6.pdf
- Boudreau, Y. (2019). Une ferme vaut en moyenne 2,8 M\$ au Québec. *Bioclips*, 27(7), 2. Repéré à https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Bioclips/BioClips2019/Volume27_no7.pdf
- Boutros, M. (2019, 31 juillet). Des drones à la ferme. *Le Devoir*. Repéré à <https://www.ledevoir.com/societe/environnement/559751/des-drones-a-la-ferme>
- Bradshaw, B., Dolan, H., et Smit, B. (2004). Farm-Level Adaptation to Climatic Variability and Change : Crop Diversification in the Canadian Prairies. *Climatic Change*, 67(1), 119-141. <https://doi.org/10.1007/s10584-004-0710-z>
- Brandle, J. R., Hodges, L., Tyndall, J., et Sudmeyer, R. A. (2009). Windbreak practices. *North American agroforestry: An integrated science and practice*, 75-104.

- Brandle, J. R., Hodges, L., et Zhou, X. H. (2004). *Windbreaks in North American Agricultural Systems*. Repéré à https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1389&context=agronomy&pub_et=etsei-redir=1&referer=https%253A%252F%252Fscholar.google.ca%252Fscholar%253Fhl%253Dfr%2526as_sdt%253D0%25252C5%2526q%253DWindbreaks%252Bin%252BNorth%252BAmerican%252BAgricultural%252BSystems%2526btnG%253D#search=%22Windbreaks%20North%20American%20Agricultural%20Systems%22
- Brewer, T., Chatrchyan, A., Ficken, S., McDermott, L., Morrill, K., et O'Neil, K. (2018). *Climate Smart Farming in the Northeast : Six Key Strategies for Farmers*. Repéré à http://climatesmartfarming.org/wp-content/uploads/2018/11/CSF-Fact-Sheet_Key-Strategies_FinalNov2018.pdf
- Brodeur, J., Boivin, G., Bourgeois, G., Cloutier, C., Doyon, J., Grenier, P., et Gagnon, A. (2013). *Impact des changements climatiques sur le synchronisme entre les ravageurs et leurs ennemis naturels : Conséquences sur la lutte biologique en milieu agricole au Québec*. Repéré à <https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/RapportBrodeur2013.pdf>
- Brown, C., Follings, J., Moran, M., et Rosser, B. (2017). *Guide agronomique des grandes cultures*. Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAARO). Repéré à <http://www.omafr.gov.on.ca/french/crops/pub811/pub811.pdf>
- Bryant, C., André, P., Provençal, D., Singh, B., Thouez, J., et El Mayaar, M. (1997). L'adaptation agricole aux changements climatiques : Le cas du Québec. *Le Climat*, 14(2), 81-97.
- Bryant, C., Singh, B., Thomassin, P., et Baker, L. (2007). *Vulnérabilités et adaptation aux changements climatiques au Québec au niveau de la ferme : Leçons tirées de la gestion du risque et de l'adaptation à la variabilité climatique par les agriculteurs*. Ouranos. Repéré à https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/RapportBryant2007_FR.pdf
- Bucci, G., Bentivoglio, D., et Finco, A. (2018). Precision agriculture as a driver for sustainable farming systems : State of art in litterature and research. *Calitatea*, 19(S1), 114-121.
- Cameron, E. (2014). *Changement climatique : Répercussions sur le secteur agricole* (p. 19). University of Cambridge Institute for Sustainability Leadership. Repéré à <https://www.cisl.cam.ac.uk/business-action/low-carbon-transformation/ipcc-climate-science-business-briefings/translations/pdfs/french-new/agriculture-briefing-web-fr.pdf>
- Camirand, J. et Gingras, C. (2009). *Agriculture et climat : Vers des fermes zéro carbone*. Nature Québec. Repéré à <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/2069613>
- Canopée. (2020). Innovations. *Canopée*. Repéré à <http://canopee.io/innovations/>
- Cantin, S., et Robert-Lambert, M.-O. (2017). Portrait de la relève agricole : Un survol. *Bioclips*, 25(8), 2. Repéré à https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Bioclips/Bioclips2017/Volume_25_no8.pdf

- Carrier, A. (2005). *La rotation des cultures adaptée à l'horticulture*. MAPAQ. Repéré à <https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Regions/chaudiereappalaches/journalvisionagricole/autresarticles/horticulture/Pages/rotation.aspx>
- Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). (2016). *Engrais verts semés à la dérobée et en intercalaire—Coûts d'implantation*. Repéré à https://www.agrireseau.net/documents/Document_92674.pdf
- Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). (2019). *L'agroforesterie au bénéfice du microclimat : Un atout face aux changements climatiques*. Repéré à https://www.craaq.qc.ca/Publications-du-CRAAQ/I_agroforesterie-au-benefice-du-microclimat-un-atout-face-aux-changements-climatiques/p/PAGF0103-HTML
- Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). (2015). *Réflexion sur l'état d'adoption des technologies d'agriculture de précision au Québec*. Repéré à https://www.agrireseau.net/documents/Document_90267.pdf
- Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ). (2013). *Atlas hydroclimatique du Québec méridional : Impact des changements climatiques sur les régimes de crue, d'étiage et d'hydraulicité à l'horizon 2050*. Repéré à https://www.cehq.gouv.qc.ca/hydrometrie/atlas/Atlas_hydroclimatique_2013.pdf
- Charbonneau, É., Prado, J. M. M., Pellerin, D., Bélanger, G., Côté, A., et Allard, G. (2013). *Première évaluation de l'impact potentiel des changements climatiques sur la durabilité technico-économique et agroenvironnementale des fermes laitières au Québec*. Ouranos.
- Charron, I., Beauchemin, A., Blais-Gagnon, A., Delmotte, S., Ducruc, S., Landry, F., Jegou, G., Michaud, A., Morrisette, R., et St-Arnaud, R.-M. (2019a). *Recherche participative d'alternatives durables pour la gestion de l'eau en milieu agricole dans un contexte de changement climatique (RADEAU 1)*. Groupe AGÉCO. Repéré à https://irda.blob.core.windows.net/media/5713/michaud-et-al-2019-recherche_participative_dalternatives_durables_pour_la_gestion_de_leau_en_milieu_agricole_dans_un_contexte_de_changement_climatique.pdf
- Charron, I., Ducruc, S., et Lamoureux, M.-È. (2019b). *Étude sectorielle de la production agricole au Québec : Volet main-d'œuvre*. Repéré à <https://www.agricarrieres.qc.ca/generale/lancement-de-letude-sectorielle-de-la-production-agricole-au-quebec-volet-main-doeuv-re-edition-2019/>
- Chaussé, S., Jochems-Tanguay, L., Boislard, T., Marois-Mainguy, O., Cormier, D., et Boisclair, J. (2018). *Lâchers de trichogrammes par drones, une nouvelle approche pour lutter contre la pyralide du maïs dans le maïs sucré de transformation*. IRDA. Repéré à <https://www.legumes-transformation.qc.ca/wp-content/uploads/2018/10/projet-160306-rapport-final.pdf>
- Clearwater, R. L., T. Martin, et T. Hoppe. (2016). *L'agriculture écologiquement durable au Canada : Série sur les indicateurs agroenvironnementaux—Rapport n°4*. Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC). Repéré à http://epe.lac-bac.gc.ca/100/201/301/weekly_acquisitions_list-ef/2016/16-28/publications.gc.ca/collections/collection_2016/aac-aafc/A22-201-2016-fra.pdf

- Cogliastro, A., Kouchner, C., et Bouttier, L. (2013, février). *Interactions entre les arbres et les cultures dans des systèmes de cultures intercalaires agroforestières dans un contexte de changements climatiques*. Communication présentée à la Journée scientifique - Agroforesterie, Drummondville, Québec. Repéré à https://www.agrireseau.net/documents/Document_91558.pdf
- Conseil canadien pour les ressources humaines en agriculture (CCRHA). (2016). *Québec : Prévisions du marché du travail agricole du Québec jusqu'en 2025*. Repéré à https://cahrc-ccrha.ca/sites/default/files/files/Labour-Employment/QC_reportFR.pdf
- Conseil des appellations réservées et des termes valorisants du Québec (CARTV). (2018). *Répartition actuelle des entreprises par type de culture*. Portail Bio Québec. Repéré à <https://www.portailbioquebec.info/repartition-exploitants-par-culture>
- Conseil des productions végétales du Québec (CPVQ). (2000). *Guide des pratiques de conservation en grandes cultures : Le travail réduit*. <https://www.agrireseau.net/agroenvironnement/documents/Feuillet2B.pdf>
- Conseil québécois des plantes fourragères (CQPF). (2018). *Planification stratégique du secteur québécois des plantes fourragères 2018-2022*. Repéré à <https://www.agrireseau.net/grandescultures/documents/97121/planification-strategique-du-secteur-quebecois-des-plantes-fourrageres-2018-2022>
- Cournoyer, A. (2020, juillet 27). Gestion AgrIA: cultiver plus en polluant moins pour nourrir plus de monde. *UnPointCinq*. Repéré à <https://unpointcinq.ca/sinspirer/gestion-agria-cultiver-plus-en-polluant-moins/>
- Crawford, E., MacNair, E., Beveridge, R., et Connell, D. J. (2012). *BC Agriculture Climate Change Adaptation Risk + Opportunity Assessment : Provincial Report*. British Columbia Agriculture et Food Climate Action Initiative.
- Da Silva, L., et Belzile, L. (2017, novembre). *Les enjeux économiques des changements climatiques en agriculture*. Webinaire Agriclimat. Repéré à http://content.pqm.net/upa/3348-Webinaire_14nov2017V5.pdf
- David, P. (2020, 18 avril). Vers plus d'autonomie alimentaire au Québec. *Le Devoir*. Repéré à <https://www.ledevoir.com/societe/environnement/577058/vers-plus-d-autonomie-alimentaire-au-quebec>
- De Baets, N., Gariépy, S., et Vézina, A. (2007). *Le portrait de l'agroforesterie au Québec*. Agriculture et agroalimentaire Canada (AAC). Repéré à https://www.agrireseau.net/Agroforesterie/documents/agroforest_version_integrale.pdf
- Delgado, J. A., et Gantzer, C. J. (2015). The 4Rs for cover crops and other advances in cover crop management for environmental quality. *Journal of Soil and Water Conservation*, 70(6), 142A-145A. <https://doi.org/10.2489/jswc.70.6.142A>

- Delgado, J. A., Groffman, P. M., Nearing, M. A., Goddard, T., Reicosky, D., Lal, R., Kitchen, N. R., Rice, C. W., Towery, D., et Salon, P. (2011). Conservation practices to mitigate and adapt to climate change. *Journal of Soil and Water Conservation*, 66(4), 118A-129A. <https://doi.org/10.2489/jswc.66.4.118A>
- Delmotte, S. (2019, janvier). *Impacts des changements climatiques sur la gestion de l'eau pour l'irrigation en horticulture*. Communication présentée à la Journée horticole 2019, Terrebonne, Qc. Repéré à https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Regions/LavalLanaudiere/inpactschangementsclimatiques_eau.pdf
- Desperrier-Roux, J., et Weill, A. (2020). *Désherbage mécanique : Systèmes de guidage*. Centre d'expertise et de transfert en agriculture biologique et de proximité (CETAB+). Repéré à <https://cetab.bio/publication/desherbage-mecanique-fiche-technique-les-systemes-de-guidage/>
- Deutsch, C. A., Tewksbury, J. J., Tigchelaar, M., Battisti, D. S., Merrill, S. C., Huey, R. B., et Naylor, R. L. (2018). Increase in crop losses to insect pests in a warming climate. *Science*, 361(6405), 916-919.
- Direction de l'expertise hydrique. (2018). *Document d'accompagnement de l'Atlas hydroclimatique*. Repéré à <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/3642443>
- ÉcoRessources. (2012). *Contexte d'adoption de la gestion intégrée des ennemis des cultures*. Union des producteurs agricoles (UPA). Repéré à https://www.agrireseau.net/agroenvironnement/documents/Rapport%20ÉcoRessources_final.pdf
- Fédération québécoise des producteurs de fruits et légumes de transformation (FQPFLT). (s. d.). *Améliorer la surveillance phytosanitaire québécoise par le déploiement de réseaux de capteurs de spores sentinelles*. Repéré à <https://www.legumes-transformation.qc.ca/recherche-developpement/ameliorer-la-surveillance-phytosanitaire-quebecoise-par-le-deploiement-de-reseaux-de-capteurs-de-spores-sentinelles/>
- Firlej, A., et Saguez, J. (2019). *Changements climatiques et phytoprotection au Québec : Synthèse et recommandations*. Repéré à https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/synthese_sur_les_changements_climatiques_en_agriculture.pdf
- Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., Mueller, N. D., O'Connell, C., Ray, D. K., West, P. C., Balzer, C., Bennett, E. M., Carpenter, S. R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., ... Zaks, D. P. M. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478(7369), 337-342. <https://doi.org/10.1038/nature10452>
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2012). *Climate Change Adaptation and Mitigation in Agriculture*. Repéré à <http://www.fao.org/elearning/Course/FCC/en/pdf/learnernotes0856.pdf>
- Gagnon, A., Roy, M., et Roy, A. (2011). *Impacts directs et indirects des changements climatiques sur les ennemis des cultures*. Repéré à https://agriclimat.ca/wp-content/uploads/2018/10/2.-Impacts-directs-et-indirects-des-CC-sur-les-ennemis-des-cultures_Gagnon-et-al.pdf

- Gagnon, A., Arsenault-Labrecque, G., Bourgeois, G., Bourdages, L., Grenier, P., et Roy, M. (2013). *Études de cas pour faciliter une gestion efficace des ennemis des cultures dans le contexte de l'augmentation des risques phytosanitaires liés aux changements climatiques*. Repéré à <https://www.ouranos.ca/publications/>
- Garneau, J. (2019). Revenus d'exploitation des entreprises agricoles de petite taille. *Bioclips*, 27(35), 2. Repéré à https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Bioclips/BioClips2019/Volume_27_no_35.pdf
- Gavelle, E. (2015). *Surveillance phytosanitaire des cultures de pommes de terre à l'aide de la télédétection par aéronef sans pilote* (Mémoire de maîtrise). Département de géomatique appliquée, Université de Sherbrooke, Québec.
- Gendron, R., et Vézina, M.-J. (2017). *Engrais verts en intercalaire dans la production conventionnelle de maïs sucré*. Groupe ProConseil. Repéré à https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Agroenvironnement/13-SCS-26_Rapport.pdf
- Gilbert, C., et Hitayezu, F. (2018). Les exportations de produits bioalimentaires québécois à l'horizon 2025. *Bioclips+*, 19(1), 14. Repéré à https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Bioclips/BioClipsPlus_Avril2018_Vol19_No1.pdf
- Giroux, D. (2014). *Évaluation de l'effet structurant de différents engrais verts de printemps et d'automne sur des sols dégradés en production maraîchère*. Repéré à https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Regions/ChaudiereAppalaches/Agroenvironnement/Rapport_effet_structurant_engrais_verts_sols_degrades.pdf
- Gouvernement du Canada. (2018). *Portrait sectoriel du Québec 2018-2020 : Agriculture : Cultures agricoles, élevage et aquaculture*. Repéré à https://www.guichetemplois.gc.ca/content_pieces-eng.do?cid=11244
- Gouvernement du Québec. (2011). *Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture, 2011-2021*. repéré à https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Publications/Strategie_phytosanitaire.pdf
- Gouvernement du Québec. (2012). *Le Québec en action vert 2020 : Stratégie gouvernementale d'adaptation aux changements climatiques 2013-2020*. Ministère du développement durable, environnement et parcs. Repéré à <http://deslibris.ca/ID/237180>
- Gowda, P. H., Steiner, J., Olson, C., Boggess, M., Farrigan, T., et Grusak, M. A. (2018). *Chapter 10 : Agriculture and Rural Communities. Impacts, Risks, and Adaptation in the United States: The Fourth National Climate Assessment, Volume II*. U.S. Global Change Research Program. <https://doi.org/10.7930/NCA4.2018.CH10>
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2014). *Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse : contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. Repéré à https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_fr.pdf

- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2018a). *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*.
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_High_Res.pdf
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2018b). *Réchauffement planétaire de 1,5 °C : Résumé à l'intention des décideurs, Résumé technique et Foire aux questions*.
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/SR15_Summary_Volume_french.pdf
- Hatfield, J., Takle, G., Grotjahn, R., Holden, P., Izaurrealde, R. C., Mader, T., Marshall, E., Liverman, D., Melillo, J. M., Richmond, T. (T. C.), et Yohe, G. W. (2014). *Chapter 6 : Agriculture. Climate Change Impacts in the United States: The Third National Climate Assessment*. U.S. Global Change Research Program. <https://doi.org/10.7930/J02Z13FR>
- Hilliard, C., et Reedyk, S. (2020, janvier 24). *Lutte aux ravageurs et qualité de l'eau*. Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC). Repéré à <https://www.agr.gc.ca/fra/agriculture-et-climat/pratiques-agricoles/agriculture-et-eau/protection-des-bassins-hydrographiques/agriculture-et-la-qualite-de-leau/lutte-aux-ravageurs-et-qualite-de-l-eau/?id=1187629341555#a2>
- Howden, S. M., Soussana, J.-F., Tubiello, F. N., Chhetri, N., Dunlop, M., et Meinke, H. (2007). Adapting agriculture to climate change. *Proceedings of the national academy of sciences*, 104(50), 19691-19696.
- Institut de la statistique du Québec (ISQ). (2019). *Profil sectoriel de l'industrie bioalimentaire au Québec*. Repéré à <http://www.deslibris.ca/ID/10102267>
- Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA). (s. d.). *Pièges automatisés pour la surveillance phytosanitaire des vergers : Évaluation des systèmes actuels et potentiel futur pour le Québec*. Repéré à <https://www.irda.qc.ca/fr/projets-recherche/pieges-autimatises/>
- Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA). (2020). *Irrigation des plantes fourragères : Outiller le milieu pour qu'il puisse prendre les bonnes décisions*. Repéré à <https://www.irda.qc.ca/fr/projets-recherche/irrigation-plantes-fourrageres/>
- Jacobs, C., Berglund, M., Kurnik, B., Dworak, T., Marras, S., Mereu, V., et Michetti, M. (2019). *Climate change adaptation in the agriculture sector in Europe*. European Environment Agency (EEA). Repéré à <https://www.eea.europa.eu/publications/cc-adaptation-agriculture>
- Janowiak, M. K., Dostie, D. N., Wilson, M. A., Kucera, M. J., Skinner, R. H., Hatfield, J. L., Hollinger, D., et Swanston, C. W. (2016). Adaptation Resources for Agriculture : Responding to Climate Variability and Change in the Midwest and Northeast. *U.S. Department of Agriculture (USDA)*, 72. Repéré à https://www.climatehubs.usda.gov/sites/default/files/adaptation_resources_workbook_ne_mw.pdf

- Jégo, G., Delmotte, S., Delisle, S., Bélanger, G., Thivierge, M.-N., Martel, H., et Ruel, D. (2020). *Changements climatiques et plantes fourragères : Impacts attendus et exemples d'adaptations*. Repéré à https://www.agrireseau.net/documents/Document_102140.pdf
- Jing, Q., Bélanger, G., Qian, B., et Baron, V. (2013). Timothy yield and nutritive value under climate change in Canada. *Agronomy Journal*, 105(6), 1683-1694.
- Jobin, P., et Douville, Y. (1997). *Engrais verts et cultures intercalaires*. Centre de développement d'agrobiologie. Repéré à <https://www.agrireseau.net/grandescultures/documents/79565>
- Kaye, J. P., et Quemada, M. (2017). Using cover crops to mitigate and adapt to climate change. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(1), 4. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0410-x>
- Lamarre, V. (2014, novembre). *La compaction des sols : Comprendre pour réduire l'impact des pratiques culturales*. CRAAQ. Communication présentée au Colloque sur la pomme de terre, Lévis, Québec. Repéré à https://www.agrireseau.net/documents/Document_89590.pdf
- Lanoie, N., et Vanasse, A. (2017). *Effets des rotations et autres pratiques culturales sur les mauvaises herbes dans les grandes cultures*. CRAAQ. Repéré à <https://www.craaq.qc.ca/Publications-du-CRAAQ/effets-des-rotations-et-autres-pratiques-culturales-sur-les-mauvaises-herbes-des-grandes-cultures-revue-de-litterature/p/PGCC0104-01PDF>
- Laplanche El Haïli, M. (2017, 5 juillet). Les capteurs de spores, ça marche! *La Terre de Chez Nous*. Repéré à <https://www.laterre.ca/actualites/capteurs-de-spores-ca-marche>
- Laroche, G., et Olivier, A. (2015). Contexte politique québécois et pratique de l'agroforesterie : État des lieux. *The Forestry Chronicle*, 91(05), 524-533. <https://doi.org/10.5558/tfc2015-091>
- Le Bulletin des agriculteurs. (2020, 14 juin). Traquer un ravageur avec une caméra. *Le Bulletin Des Agriculteurs*. Repéré à <https://www.lebulletin.com/cultures/traquer-un-ravageur-avec-une-camera-106752>
- Lease, N. A., Pichette, A., et Chaumont, D. (2009). *Projet d'étude sur l'adaptation aux changements climatiques du secteur de la pomme au Québec*. Ouranos.
- Leblanc, M. (2017). Cultures biologiques : La techno au service du sarclage. *Vecteur Environnement*, 50(1), 24.
- Leblanc, M., et Lefebvre, M. (2020). *Outils de désherbage physique en production maraîchère*. CRAAQ. https://www.craaq.qc.ca/Publications-du-CRAAQ/fiches-outils-de-desherbage-physique-en-production-maraichere/p/PABIO103-PDF#tab_tab1
- Lefebvre, M., et Leblanc, E. M. (2018). *Développement d'une régie de production biologique de jeunes pousses de légumes : Mauvaises herbes versus cultures de couvertures et fertilisation organique*. IRDA. Repéré à https://irda.blob.core.windows.net/media/5367/leblanc-lefebvre-2018-mauvaises_herbes_versus_culture_de_couverture_et_fertilisation_organique.pdf

- Lepage, M.-P., Bourdages, L., Bourgeois, G. (2012a). *Interprétation des scénarios de changements climatiques afin d'améliorer la gestion des risques pour l'agriculture*. Ouranos. Repéré à <http://www.deslibris.ca/ID/233041>
- Lepage, M.-P., Bourgeois, G., et Bélanger, G. (2012b). *Indices agrométéorologiques pour l'aide à la décision dans un contexte de climat variable et en évolution*. CRAAQ. Repéré à https://www.craaq.qc.ca/Publications-du-CRAAQ/indices-agrometeorologiques-pour-l_aide-a-la-decision-dans-un-contexte-de-climat-variable-et-en-evolution/p/PAGR0103
- Lhissou, R., Chokmani, K., Gill-Fortin, J., Agili, H., Poulin, J., et Bergeron, D. (2018). *Dépistage automatique des doryphores dans la culture de pomme de terre à l'aide de l'imagerie par drone et de la vision artificielle : Étude de faisabilité*. Centre Eau Terre Environnement - Institut national de la recherche scientifique (INRS-ETE). Repéré à <http://espace.inrs.ca/id/eprint/7330/1/R1794.pdf>
- Lizotte, P.-L. (2019, 9 janvier). *Les drones et l'imagerie satellitaire en agriculture*. Communication présentée au 7e colloque céréales à paille et canola, Rivière-du-Loup, Québec. Repéré à https://www.agrireseau.net/documents/101638/les-drones-et-l_imagerie-satellitaire-en-agriculture
- Lizotte, P.-L., Beaulieu, C., et Legaré, G. (2018). *Étude des systèmes de guidage et modélisation économique de l'agriculture à circulation contrôlée au Québec*. Développement agricole des Basques. https://www.agrireseau.net/agroenvironnement/documents/99088/etude-des-systemes-de-guidage-et-modelisation-economique-de-l_agriculture-a-circulation-controlee-au-quebec
- Loboguerrero, A. M., Birch, J., Thornton, P. K., Meza, L., Sunga, I., Bong, B. B., Rabbinge, R., Reddy, M., Dinesh, D., et Korner, J. (2018). *Feeding the World in a Changing Climate : An Adaptation Roadmap for Agriculture*. Repéré à https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/97662/18_WP_GCA_Agriculture_1018.pdf?sequence=4&etisAllowed=y
- Lussier, C., et Cogliastro, A. (2018). *Système agroforestier intercalaire expérimental à Clarenceville. Progrès forestier*. Repéré à <http://agrobonsens.com/wp-content/uploads/2018/12/sai-progforaut18.pdf>
- Macrae, M. L., et Michaud, A. (2018). *Managing subsurface drainage water to optimize crop productivity, nutrient use and water availability in contemporary and future climate*. Quebec-Ontario Cooperation for Agri-Food Research. Repéré à <https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/RapportMichaud2019.pdf>
- Martin, S., Malenfant, N., Hoorman, J. J., et Ménard, O. (2011). *Culture de couverture : Les pratiques agricoles de conservation*. Repéré à https://www.agrireseau.net/agriculturebiologique/documents/Cultures%20de%20couverture_2011.pdf
- Martineau, I., Boivin, F., et Léger, É. (2013). *À chacun sa bande : Guide des bandes riveraines en milieu agricole*. Club-conseil Gestrie-sol. Repéré à https://www.agrireseau.net/documents/Document_88852.pdf

- McHugh, A. D., Tullberg, J. N., et Freebairn, D. M. (2009). Controlled traffic farming restores soil structure. *Soil and Tillage Research*, 104(1), 164-172. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.10.010>
- McPhee, J. (2009). *The benefits of Controlled Traffic Farming to assist adaptation to climate change for Australian crop production industries*. Repéré à <http://ecite.utas.edu.au/56072>
- Mercier, C. (2019, 13 septembre). La fréquence des inondations, un casse-tête pour les agriculteurs. *Radio-Canada.ca*. Repéré à <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1300020/agriculture-zone-inondable-avenir-perte-culture-sol>
- Meyer-Aurich, A., Weersink, A., Janovicek, K., et Deen, B. (2006). Cost efficient rotation and tillage options to sequester carbon and mitigate GHG emissions from agriculture in Eastern Canada. *Agriculture, Ecosystems et Environment*, 117(2-3), 119-127. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.03.023>
- Michaud, A., Gasser, M.-O., Blais-Gagnon, A., Tremblay, M.-È., et Huertas, W. (2020). *Comparaison de la culture annuelle à la culture en fin de saison d'engrais vert de légumineuses pour augmenter la résilience du sol et fournir un apport suffisant de N dans un contexte climatique défavorable*. Repéré à https://irda.blob.core.windows.net/media/5634/michaud-et-al-2020-comparaison_de_la_culture_annuelle_a_la_culture_en_fin_de_saison_dengrais_vert_de_legumineuses_pour_augme.pdf
- Michaud, A., Gombault, C., Cyr, J.-F., et Côté, H. (2012). *Implications des scénarios climatiques futurs sur la gestion des sols et de l'eau à la ferme*. Ouranos. Repéré à https://www.craaq.qc.ca/documents/files/comites/comagr/pagr0106_final.pdf
- Michaud, A., et Macrae, M. (2018). *Gérer les eaux de drainage souterraines afin d'optimiser la productivité des cultures, l'utilisation des nutriments et la disponibilité de l'eau en climat actuel et futur*. Repéré à https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/FicheMichaud2019_FR.pdf
- Mimee, B., Brodeur, J., Bourgeois, G., et Moiroux, J. (2014). *Quels enjeux représentent les changements climatiques en lien avec les espèces exotiques envahissantes pour la culture du soya au Québec?* Repéré à <https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/RapportMimee2014.pdf>
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). (s. d.a). *Améliorer la surveillance phytosanitaire québécoise par le déploiement de réseaux de capteurs de spores sentinelles*. Repéré à https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Agroenvironnement/PV-3.2-DP-PHYT-22_Resume.pdf
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). (s. d.b). *Évaluation de la performance des pièges à insectes automatisés dans certaines cultures maraîchères et fruitières au Québec*. Repéré à https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Agroenvironnement/PV-3.2-DP-CIEL-34_Resume.pdf

- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). (s. d.c). *Évaluation de l'efficacité de quatre types de pièges automatisés pour le suivi de cinq ravageurs d'importance au Québec*. Repéré à https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Agroenvironnement/PV-3.2-DP-PHYTO-26_Resume.pdf
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). (2002). *Le compactage des sols et les pneumatiques*. Repéré à <https://www.agrireseau.net/banqueplans/Documents/Feuillet%2090403.pdf>
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). (2017). *Portrait-diagnostic sectoriel des légumes frais au Québec*. Repéré à <https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Publications/Portraitsectoriellegumesfrais.pdf>
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). (2018a). *Développement d'un outil de surveillance du doryphore de la pomme de terre à l'aide d'imagerie de télédétection acquise par un aéronef sans pilote*. Repéré à https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Agroenvironnement/PV-3.2-DP-CIEL-35_Resume.pdf
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). (2018b). *Portrait de la relève agricole au Québec 2016*. Repéré à https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Publications/Portrait_releveagricole.pdf
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). (2018c). *Production agricole*. Repéré à <https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/md/statistiques/Pages/production.aspx>
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). (2018d). *Santé des sols*. Repéré à <https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Productions/Agroenvironnement/sol-eau/sol/Pages/Sol.aspx>
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). (2019a). *Culture des légumes de champ*. Repéré à <https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Productions/Production/Pages/Legumes-de-champ.aspx>
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). (2019b). *Plan stratégique 2019-2023 du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation*. Repéré à https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/agriculture-pecheries-alimentation/publications-adm/plan-strategique/PL_plan-strategique2019-2023_MAPAQ.pdf?1575473076
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). (2019c). *Portrait-diagnostic sectoriel de l'industrie des grains au Québec*. Repéré à <https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Publications/Monographiegrain.pdf>
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). (2019d). *Agroforesterie—Adaptation aux changements climatiques*. Repéré à <https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Productions/md/programmesliste/agroenvironnement/anciens-sous-volets/volet4/Pages/Agroforesterie.aspx>

- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). (2020a). *Types de productions*. Repéré à <https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Productions/Production/Pages/typesdeproductions.aspx>
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). (2020b). *Cultures de couverture en production de grandes cultures*. Repéré à <https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Regions/monteregie/profil/Pages/Cultures-de-c1128-6729.aspx>
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC). (2019). *Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2017 et leur évolution depuis 1990*. Repéré à <http://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/2017/inventaire1990-2017.pdf>
- Mize, C. W., Brandle, J. R., Schoeneberger, M. M., et Bentrup, G. (2008). Ecological Development and function of Shelterbelts in Temperate North America. In S. Jose et A. M. Gordon (Éds.), *Toward Agroforestry Design* (Vol. 4, p. 27-54). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6572-9_3
- Morand, A., Douglas, A., Eyzaguirre, J., De La Cueva Bueno, P., Robinson, D., Comer, N., Sparling, E., Cheng, V., et Lafrenière, C. (2017). *Climate Change Adaptation and Agriculture : Addressing Risks and Opportunities for Corn Production in Southwestern Ontario*. Ontario Centre for Climate Impacts and Adaptation Resources (OCCIR). Repéré à http://www.climateontario.ca/doc/p_OCAAF/OCAAF-AdaptationOptionsForCornInSouthwesternOntario_FINAL.pdf
- Moreau-Richard, J. (s. d.). *Démarrage d'essais de systèmes de semis direct sous couverture végétale permanente dans le maïs-grain et le soya*. MAPAQ. Repéré à https://www.agrireseau.net/grandescultures/documents/jmr_mapaq_final.pdf
- Mousseau, E. (2018). *Feuille technique—Prescription d'azote à taux variable*. Repéré à https://www.agrireseau.net/grandescultures/documents/97470/feuille-technique-prescription-d_azote-a-taux-variable
- Myers, S. S., Zanolatti, A., Kloog, I., Huybers, P., Leakey, A. D., Bloom, A. J., Carlisle, E., Dietterich, L. H., Fitzgerald, G., et Hasegawa, T. (2014). Increasing CO₂ threatens human nutrition. *Nature*, 510(7503), 139-142.
- Nawaz, A., et Ahmad, J. N. (2015). Insect Pest Management in Conservation Agriculture. In M. Farooq et K. H. M. Siddique (Éds.), *Conservation Agriculture* (p. 133-155). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-11620-4_6
- N'Dayegamiye, A., Tremblay, G., et Deschênes, P. (2013). *Bénéfices des légumineuses dans les rotations de cultures*. Repéré à https://irda.blob.core.windows.net/media/2371/ndaye-et-al-2013_fiche_benefices_legumineuses_rotations.pdf
- Olar, M., et Boutin, D. (2014). *Biens et services écologiques associés aux pratiques agroforestières : L'intérêt du producteur agricole et de la société*. Repéré à https://afsq.org/wp-content/uploads/2017/07/BSE_et_pratiques_agroforestieres_5_fiches.pdf

- Ouranos. (2015). *Vers l'adaptation : Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec*. Repéré à <https://www.ouranos.ca/synthese-2015/>
- Parent, M.-J. (2020, 1^{er} septembre). Devrions-nous irriguer les plantes fourragères ? *Le Bulletin Des Agriculteurs*. Repéré à <https://www.lebulletin.com/cultures/devrions-nous-irriguer-les-plantes-fourrageres-108361>
- Peichl, M., Thevathasan, N. V., Gordon, A. M., Huss, J., et Abohassan, R. A. (2006). Carbon sequestration potentials in temperate tree-based intercropping systems, southern Ontario, Canada. *Agroforestry systems*, 66(3), 243-257.
- Pérusse, L., Leblanc, M., Trahan, R., Desroches, C., Beaudry, É., St-Amand, C., Laquerre, S., et Trottier, S. (2013). *Intégration de différentes plantes de couverture dans la production des grandes cultures dans un système de semis-direct (SCV) et impact sur la gestion des mauvaises herbes* (p. 2). MAPAQ. Repéré à https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Recherche_Innovation/Grandescultures/11-327.pdf
- Pigeon, S., Fortier, C., Coderre, F., et Drolet, J.-Y. (2012). *Travail réduit du sol—Fiche détaillée*. Bureau de l'efficacité et de l'innovation énergétique. Repéré à https://transitionenergetique.gouv.qc.ca/fileadmin/medias/pdf/agroalimentaire_agricole/14-Travail_réduit_du_sol.pdf
- Pitesky, M., Gunasekara, A., Cook, C., et Mitloehner, F. (2014). Adaptation of Agricultural and Food Systems to a Changing Climate and Increasing Urbanization. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, 1(2), 43-50. <https://doi.org/10.1007/s40518-014-0006-5>
- Piva, A., Bertrand, A., Bélanger, G., Castonguay, Y., et Seguin, P. (2013). Growth and physiological response of timothy to elevated carbon dioxide and temperature under contrasted nitrogen fertilization. *Crop Science*, 53(2), 704-715.
- Plouffe, D., et Bourgeois, G. (2012). *Modèles bioclimatiques pour la prévision des risques associés aux ennemis des cultures dans un contexte de climat variable et en évolution*. CRAAQ. Repéré à <https://www.craaq.qc.ca/documents/files/MDAGR011/PAGR0105.pdf>
- Poeplau, C., et Don, A. (2015). Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems et Environment*, 200, 33-41. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.10.024>
- Porter, J.R., L. Xie, A.J. Challinor, K. Cochrane, S.M. Howden, M.M. Iqbal, D.B. Lobell, and M.I. Travasso, 2014: Food security and food production systems. Dans : *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 485-533

- Prairie Climate Centre. (2020). *Agriculture*. Atlas climatique du Canada. Repéré à <https://atlasclimatique.ca/agriculture>
- Primeau, M. (2019, juin 28). Changements climatiques : Les agriculteurs en auront plein les bottes. *La Terre de Chez Nous*. Repéré à <https://www.laterre.ca/actualites/environnement/changements-climatiques-les-agriculteurs-en-auront-plein-les-bottes>
- PRISME. (s. d.). *Capteurs de spores et suivi de l'inoculum aérien*. PRISME Consortium. Repéré à <https://prisme.ca/services/capteurs-de-spores/>
- Qian, B., Gameda, S., Zhang, X., et De Jong, R. (2012). Changing growing season observed in Canada. *Climatic change*, 112(2), 339-353.
- Radio-Canada. (2019, 30 août). De nouvelles variétés de pommes de terre adaptées aux changements climatiques. *Radio-Canada*. Repéré à <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1281235/pommes-terre-changements-climatiques-varietes-essais-ile-prince-edouard>
- Ray, D. K., Gerber, J. S., MacDonald, G. K., et West, P. C. (2015). Climate variation explains a third of global crop yield variability. *Nature Communications*, 6(1), 5989. <https://doi.org/10.1038/ncomms6989>
- Ressources naturelles Canada (RNCan). (2015). *En quoi consiste l'adaptation?* Ressources naturelles Canada. https://www.rncan.gc.ca/changements-climatiques/impacts-et-adaptation/en-quoi-consiste-ladaptation/10026?_ga=2.252217801.1369394843.1586990169-836886158.1586990169
- Rivest, D. (2010). *Les systèmes de cultures intercalaires avec arbres feuillus : Jumeler production de bois et production agricole tout en protégeant l'environnement*. Agriculture et agroalimentaire Canada (AAC). Repéré à [https://www.agrireseau.net/Agroforesterie/documents/Agroforesterie_cultures_intercalaires_FR\(1Mo\).pdf](https://www.agrireseau.net/Agroforesterie/documents/Agroforesterie_cultures_intercalaires_FR(1Mo).pdf)
- Rivest, D., Cogliastro, A., Vanasse, A., et Olivier, A. (2009). Production of soybean associated with different hybrid poplar clones in a tree-based intercropping system in southwestern Québec, Canada. *Agriculture, Ecosystems et Environment*, 131(1-2), 51-60. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.08.011>
- Rivest, D., et Vézina, A. (2015). Maize yield patterns on the leeward side of tree windbreaks are site-specific and depend on rainfall conditions in eastern Canada. *Agroforestry Systems*, 89(2), 237-246.
- Robert, L. (2008, novembre). *Diversifier nos cultures : Profit à court terme ou rentabilité à long terme?*. Communication présenté au Colloque en agroenvironnement, Drummondville, Québec. Repéré à https://www.agrireseau.net/agroenvironnement/documents/robert_louis_ar.pdf
- Rosenzweig, C., et Tubiello, F. N. (2007). Adaptation and mitigation strategies in agriculture : An analysis of potential synergies. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 12(5), 855-873. <https://doi.org/10.1007/s11027-007-9103-8>

- Roullé, N. (2019). Le dépistage par les drones : Où en est-on? *Québec Vert*, 5. Repéré à <https://www.iqdho.com/images/stories/pdf/Le%20dpistage%20par%20les%20drnes-o%20en%20est-on.pdf>
- Saguez, J. (2019). *Impact des changements climatiques et mesures d'adaptation pour les ravageurs présents et potentiels en grandes cultures au Québec* (p. 96). Ouranos. Repéré à <https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/RapportSaguez2019.pdf>
- Sanscartier, R., Hernandez, M., et Blakime, K. (2018). *Guide à l'intention des MRC du Québec pour l'intégration des opportunités et des menaces découlant de l'évolution du climat dans l'élaboration ou l'actualisation d'un PDZA*. Coop Carbone. Repéré à http://coopcarbone.coop/fr/activites/consultation/ÉcoRessource_Cadre_Métho_Intégration_CC_PDZA_FINAL.pdf
- Schlenker, W., Roberts, M. J., et Smith, V. K. (2009). Nonlinear Temperature Effects Indicate Severe Damages to U.S. Crop Yields under Climate Change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(37), 15594-15598. JSTOR. <https://www.jstor.org/stable/40484767>
- Schoeneberger, M., Bentrup, G., de Gooijer, H., Soolanayakanahally, R., Sauer, T., Brandle, J., Zhou, X., et Current, D. (2012). Branching out : Agroforestry as a climate change mitigation and adaptation tool for agriculture. *Journal of Soil and Water Conservation*, 67(5), 128A-136A. <https://doi.org/10.2489/jswc.67.5.128A>
- Searchinger, T., Waite, R., Hanson, C., Ranganathan, J., Dumas, P., et Matthews, E. (2019). Creating a Sustainable Food Future-A Menu of Solutions to Feed Nearly 10 Billion People by 2050. *World Resources Institute (WRI)*. Repéré à <https://www.wri.org/publication/creating-sustainable-food-future>
- Shafer, S. R., Walthall, C. L., Franzluebbers, A. J., Scholten, M., Meijs, J., Clark, H., Reisinger, A., Yagi, K., Roel, A., Slattey, B., Campbell, I. D., McConkey, B. G., Angers, D. A., Soussana, J.-F., et Richard, G. (2011). Emergence of the Global Research Alliance on Agricultural Greenhouse Gases. *Carbon Management*, 2(3), 209-214. <https://doi.org/10.4155/cmt.11.26>
- Sitaula, B., Hansen, S., Sitaula, J., et Bakken, L. (2000). Effects of soil compaction on N₂O emission in agricultural soil. *Chemosphere-Global change science*, 2(3-4), 367-371.
- Smit, B., et Skinner, M. W. (2002). Adaptation options in agriculture to climate change : A typology. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 7(1), 85-114.
- Smith, P., et Olesen, J. E. (2010). Synergies between the mitigation of, and adaptation to, climate change in agriculture. *The Journal of Agricultural Science*, 148(5), 543-552. <https://doi.org/10.1017/S0021859610000341>
- Société canadienne de météorologie et d'océanographie (SCMO). (2014). *Que sont les changements climatiques d'origine humaine?* Repéré à https://www.cmos.ca/site/ps_pos_statements?a=7etlanguage=fr_FR

- Soto, I., Barnes, A., Balafoutis, A., Beck, B., Sánchez, B., Vangeyte, J., Fountas, S., Van der Wal, T., Eory, V., et Gómez-Barbero, M. (2019). *The contribution of precision agriculture technologies to farm productivity and the mitigation of greenhouse gas emissions in the EU*. Repéré à http://publications.europa.eu/publication/manifestation_identifier/PUB_KJNA29320ENN
- SoyaGen. (s. d.). *SoyaGen*. Repéré à <https://soyagen.ca/>
- Statistique Canada. (2014). *Le Recensement de l'agriculture dénombre 30 675 fermes au Québec*. Repéré à <https://www150.statcan.gc.ca/n1/ca-ra2006/analysis-analyses/que-qc-fra.htm#r1>
- Statistique Canada. (2018a). *Tableau 32-10-0406-01 : Utilisation des terres*. Repéré à <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/cv.action?pid=3210040601>
- Statistique Canada. (2018b). *Tableau 32-10-0446-01 Fermes déclarantes des technologies utilisées dans l'exploitation dans l'année civile précédant le recensement*. Repéré à <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=3210044601>
- Statistique Canada. (2018c). *Tableau 32-10-0162-01—Certaines pratiques de gestion des terres et pratiques de travail du sol utilisées pour préparer les terres pour les semis, données chronologiques*. Repéré à <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/cv.action?pid=3210016201>
- Statistique Canada. (2019). *Tableau 32-10-0413-01 Irrigation dans l'année précédant le recensement*. Repéré à <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/cv.action?pid=3210041301>
- Statistique Canada. (2020a). *Recensement de l'agriculture de 2016*. Repéré à <https://www.statcan.gc.ca/fra/ra2016>
- Statistique Canada. (2020b). *Tableau 32-10-0411-01—Pratiques et aménagements des terres*. Repéré à <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/cv.action?pid=3210041101>
- Théau, J., Gavelle, E., Ménard, P., Roberge, L., Wieland, R., et Avenel, J. (2014). *Les drones : Un allié dans le dépistage des cultures de pommes de terre* (N° 811164; p. 3). MAPAQ. Repéré à https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Recherche_Innovation/Pommesdeterre/811164.pdf
- Thevathasan, N. V., Gordon, A. M., Bradley, R., Cogliastro, A., Folkard, P., Grant, R., Kort, J., Liggins, L., Njenga, F., Olivier, A., Pharo, C., Powell, G., Rivest, D., Schiks, T., Trotter, D., Van Rees, K., Whalen, J., et Zabek, L. (2012). *Agroforestry Research and Development in Canada : The Way Forward*. In P. K. R. Nair et D. Garrity (Éds.), *Agroforestry—The Future of Global Land Use* (Vol. 9, p. 247-283). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4676-3_15
- Thibaudeau, S., et Thibault, É. (2013). *Développement des systèmes de semis direct sous couverture végétale permanente (SCV) dans les grandes cultures, dans le but d'améliorer la structure du sol et sa productivité*. Repéré à https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Recherche_Innovation/Grandescultures/11-326.pdf

- Tremblay, F., Desmeules, X., St-Pierre, N., Claveau, S., et Morissette, S. (2013). *Développement de matériel de vulgarisation relatif à la consommation de carburant et de gaz à effet de serre avec un système d'autoguidage en grandes cultures* (PV8.4-2011-005; p. 22). Agrinova. Repéré à https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Agroenvironnement/2011-005_Rapport.pdf
- Tremblay, N., et Michaud, A. (2014, novembre). *Azote à taux variable : Plus de rendement avec moins d'engrais Agri-Réseau*. Communication présentée au Colloque Fertilisation, agriculture de précision et agrométéorologie. CRAAQ. Repéré à https://www.agrireseau.net/documents/91613/azote-a-taux-variable-plus-de-rendement-avec-moins-d_engrais
- Union des producteurs agricoles (UPA). (2017). *Adaptation aux changements climatiques, mesures de réduction des gaz à effet de serre et impact de la tarification du carbone dans le contexte agricole du Québec*. Repéré à https://www.upa.qc.ca/wp-content/uploads/filebase/fr/memoires/Memoire-CC_GES-Comite-senatorial-agriculture-et-foret.pdf
- Union des producteurs agricoles (UPA). (2020a). *Coûts et aide financière*. Les bandes riveraines du Québec. Repéré à <http://www.bandesriveraines.quebec/cout-et-aide-financiere/>
- Union des producteurs agricoles (UPA). (2020b). *La réglementation*. Les bandes riveraines du Québec. Repéré à <http://www.bandesriveraines.quebec/la-reglementation/>
- USDA Northeast Climate Hub. (2016). *Cover Cropping to improve climate resilience*. Repéré à http://climatesmartfarming.org/wp-content/uploads/2016/06/AdaptationFactsheet_covercrops_2016.pdf
- Vanasse, A. (2017). *Méta-analyse sur la contribution des cultures de couverture à la dynamique de l'azote, à la qualité des sols et aux rendements des grandes cultures*. Repéré à https://www.agrireseau.net/documents/Document_101324.pdf
- Vézina, A., Lebel, F., et Rivest, C. (2009). *Analyse des coûts et bénéfices reliés à l'implantation de bandes riveraines boisées*. UPA de la Mauricie. Repéré à http://belsp.uqtr.ca/id/eprint/1348/1/UPA%20Mauricie_2009_Bandes_riveraines_boisées_A.pdf
- Walthall, C. L., Anderson, C. J., Baumgard, L. H., Takle, E., et Wright-Morton, L. (2013). Climate Change and Agriculture in the United States : Effects and Adaptation. *Geological and Atmospheric Sciences Reports*. Repéré à https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1000&et=etcontext=ge_at_reportset=etsei-redir=1&referer=https%253A%252F%252Fscholar.google.ca%252Fscholar%253Fhl%253Dfr%2526as_sdt%253D0%25252C5%2526q%253DClimate%252BChange%252Band%252BAgriculture%252Bin%252Bthe%252BUnited%252BStates%2525E2%252580%2525AF%25253A%252BEffects%252Band%252BAdaptation%2526btnG%253D#search=%22Climate%20Change%20Agriculture%20United%20States%20%3A%20Effects%20Adaptation%22

- Warren, F. J., et Lemmen, D. S. (2004). *Impacts et adaptation liés aux changements climatiques : Perspective canadienne*. Programme sur les impacts et l'adaptation aux changements climatiques. Repéré à https://www.rncan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/perspective/pdf/report_f.pdf
- Weill, A., et Roy-Fortin, V. (2014). *Évaluation du système racinaire de quatre mélanges d'engrais verts pour réduire la compaction* (N° 11-INNO1-07; p. 36). https://www.agrireseau.net/documents/90891/rapport-final-evaluation-du-systeme-racinaire-de-quatre-melanges-d_engrais-verts-pour-reduire-la-compaction
- Wolfe, D., Beem-Miller, J., Chambliss, L., et Menninger, H. (2014). *Farming Success in an Uncertain Climate*. https://ecommons.cornell.edu/bitstream/handle/1813/54950/CornellClimateChange_Farming-Success-in-an-Uncertain-Climite_FINAL-2l8vftg.pdf?sequence=1
- Wolfe, D., DeGaetano, A. T., Peck, G. M., Carey, M., Ziska, L. H., Lea-Cox, J., Kemanian, A. R., Hoffmann, M. P., et Hollinger, D. Y. (2018). Unique challenges and opportunities for northeastern US crop production in a changing climate. *Climatic Change*, 146(1-2), 231-245. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-2109-7>
- Zhang, C., et Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture : A review. *Precision agriculture*, 13(6), 693-712.
- Zhao, C., Liu, B., Piao, S., Wang, X., Lobell, D. B., Huang, Y., Huang, M., Yao, Y., Bassu, S., Ciais, P., Durand, J.-L., Elliott, J., Ewert, F., Janssens, I. A., Li, T., Lin, E., Liu, Q., Martre, P., Müller, C., ... Asseng, S. (2017). Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(35), 9326-9331. <https://doi.org/10.1073/pnas.1701762114>
- Zombre, U. (2019). Le secteur agricole au Québec : Quelques grandes tendances à la lumière des quatre derniers recensements de l'agriculture. *Bioclips*, 27(28), 2. Repéré à https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Bioclips/BioClips2019/Volume_27_no_28.pdf

**ANNEXE 1 – PISTES D’ADAPTATION TECHNOLOGIQUE ET APPROCHES INNOVANTES EN MATIÈRE DE
GESTION DE L’EAU EN AGRICULTURE** (tiré de : Charron et al., 2019a)

Tableau 1 Technologies et bonnes pratiques de type agronomique (tiré de : Charron et al., 2019a, p. 127)

Technologie/ bonnes pratiques	Courte description
Technologies en appui à l’agriculture de précision	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Étroitement reliées à l’optimisation de la régie d’irrigation ▪ Utilisation des données recueillies sans contact (drones, GPS, satellites, capteurs spécialisés) ▪ Consolidation des données de fertigation, texture du sol, rendement, densité, température foliaire, etc. ▪ Mesure de la variabilité spatiale des paramètres des champs/cultures, détection des mauvaises herbes et des maladies
Nanotechnologies	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Engrais/nanopesticides à libération contrôlée échelonnée dans le temps ou liée à un déclencheur ▪ Systèmes de libération « intelligents » ▪ Utilisation d’agents surfactants dans les herbicides ▪ Utilisation de nanomatériaux pour la formulation d’engrais/herbicides/pesticides ▪ Utilisation dans la dégradation des contaminants organiques et le traitement de l’eau ▪ Utilisées conjointement avec l’agriculture de précision
Régulateurs de croissance des plantes et osmolytes	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Contrôle de l’ouverture des stomates pour limiter la transpiration ▪ Utilisation de phytohormone ▪ Utilisation de nanoparticule pour stimuler certains enzymes lors de la germination pour augmenter la formation de biomasse ▪ Utilisation d’osmoprotecteurs pour limiter le stress hydrique selon les conditions climatiques ou contre un taux de salinité élevé d’un sol ▪ Prend comme base technologique la nanotechnologie, mais est appliqué à des processus physiologiques de la plante
Polymères « superabsorbants »	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Polyacrylamides, Hydrogel, « <i>Super Absorbant Polymer (SAP)</i> » ▪ Aujourd’hui disponible sous forme biodégradable, ce « superabsorbant » permet de retenir une grande quantité d’eau ▪ Technologie non présente au Québec pour le moment, utilisée en zone aride en champs ou peut être utile en production en serre
Pratiques culturales bénéfiques	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pratiques (travail minimal du sol, gestion des bandes riveraines, remédiation des milieux humides, culture sous couvert végétal permanent, culture sur billon, haie brise-vent, etc.) qui permettent de réduire les répercussions environnementales de l’agriculture dans son milieu, d’améliorer la capacité de rétention d’eau des sols et de réduire les besoins d’irrigation.
Paillis biodégradables	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Paillis biodégradables et compostables à base d’amidon; bioplastique ▪ Peuvent être installés avec les mêmes équipements qu’un paillis de plastique standard ▪ Augmente la productivité de l’eau dans les cultures
Paillage pulvérisable biodégradable	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Application d’un paillis pulvérisable biodégradable à la surface du sol. ▪ Produit abordable et compétitif par rapport aux paillis de plastique biodégradables.

Tableau 2 Technologie et bonnes pratiques liées à l'irrigation (tiré de : Charron et al., 2019a, p. 129)

Technologie/ bonnes pratiques	Courte description
Irrigation par déficit régulé	Visé à optimiser l'efficacité de l'utilisation de l'eau par différentes gestions de l'irrigation, telles que le séchage partiel des racines et l'irrigation goutte-à-goutte souterraine partielle alternée. L'objectif est d'augmenter le ratio photosynthèse sur transpiration pour diminuer la transpiration sans changer le statut hydrique de la plante.
Goutte-à-goutte	Enfoui ou non, le système distribue l'eau du système par des émetteurs. Les pertes par évaporation sont limitées et les risques de maladies aussi puisque l'eau est appliquée directement dans la zone racinaire.
Système d'irrigation enfoui	Le réseau de conduites est construit avec des tuyaux de métal et enterré pour obtenir un réseau de distribution permanent et durable. Les composantes du système d'irrigation peuvent donc emprunter le chemin le plus direct sous la terre et permettre un approvisionnement en eau dans des terrains irréguliers. Ce type de système s'applique surtout dans les cultures pérennes et la pomiculture.
Drainage contrôlé/irrigation souterraine	Système de drainage souterrain avec l'addition de structures de contrôle du niveau d'eau à la sortie des drains. Le système peut être utilisé en mode de drainage contrôlé (garder le plus d'eau possible en maintenant la nappe la plus élevée possible) ou en mode irrigation en ajustant l'eau au niveau de la structure. Le principe est de maintenir la nappe suffisamment élevée pour permettre l'alimentation des racines par remontée capillaire.
Traitement des eaux de drainage souterrain	Zones humides artificielles, barrières perméables et filtrantes, systèmes de dénitrification in situ, systèmes de bioremédiation des pesticides sur la ferme et filtration lente sur sable (FLS) sont des technologies qui peuvent être utilisées pour traiter les eaux de drainage en milieu agricole. Si l'effluent le permet, il pourra être réutilisé dans le système d'irrigation et (ou) recharger les étangs d'irrigation et (ou) servir pour l'irrigation souterraine. Nécessite une reformulation ou une flexibilité au niveau des normes de qualité de l'eau d'arrosage pour la réutilisation (voir Bassin de décantation, réutilisation des eaux usées dans tableau 4.6).
Optimisation du système d'irrigation (bon équipement et bonnes mesures)	Avoir une connaissance de son système d'irrigation et de son fonctionnement est le premier point de départ vers l'amélioration et l'optimisation de la régie d'irrigation. Des équipements en adéquation avec les besoins, et la mise en place d'instruments de mesure (tensiomètre, débitmètres et manomètres) sur le réseau de canalisation d'irrigation sont utilisés pour permettre un meilleur suivi des quantités d'eau d'irrigation selon le temps de chargement du système et la durée réelle d'utilisation de celui-ci.
Optimisation de la régie d'irrigation	Une fois l'équipement optimisé, la régie du système doit également l'être. Permet de consolider plusieurs renseignements (les besoins de la plante, l'évapotranspiration, les conditions climatiques, le statut hydrique du sol, les prévisions météorologiques et le type de système d'irrigation en place) au même endroit pour tendre vers l'optimisation de l'efficacité de l'utilisation de l'eau.
Sonde et capteurs sans fil	Implantation d'un réseau de capteurs sans fil à l'échelle d'un champ ou d'une ferme pour suivre l'évolution du statut hydrique du sol en temps réel. Étape de plus vers l'optimisation de la régie d'irrigation. Des technologies différentes peuvent être utilisées, comme la télédétection (TDR) (teneur en eau volumique) et la conductivité électrique.

Tableau 3 Technologies et bonnes pratiques liées aux sources d’approvisionnement (tiré de : Charron et al., 2019a, p. 131)

Technologie/ bonnes pratiques	Courte description
Bassin d’irrigation	Utilisation d’un étang d’irrigation naturel ou artificiel comme source d’approvisionnement en eau continue. Le bassin d’irrigation peut être individuel ou collectif. La recharge doit être effectuée au moment opportun.
Aération des étangs d’irrigation	Utilisation d’un système d’aération dans l’étang d’irrigation pour diminuer la charge bactérienne. L’injection de fines bulles d’airs à partir du fond de l’étang par un diffuseur d’air vient créer une circulation de l’eau à l’intérieur de l’étang pour permettre une exposition des pathogènes aux rayons ultra-violets du soleil. Permet de gérer la qualité de l’eau d’irrigation directement dans son lieu d’entreposage.
Bassin de décantation, réutilisation des eaux usées	Permet d’utiliser les eaux grises pour certaines cultures ou certains usages. La Californie et la Floride utilisent cette technologie actuellement. La gestion de l’eau de lavage des légumes est un exemple d’eaux usées qui pourraient être valorisées (épandage au sol, réutilisation dans le procédé de lavage, rejet sur place et traitement dans le centre de traitement des eaux le plus proche).
Prélèvements collectifs d’eau	Prise d’eau collective par le biais de regroupement de producteurs pour la construction d’un aqueduc qui permettrait d’aller chercher de l’eau pour assurer le remplissage d’un étang d’irrigation commun. Par exemple, la création de nouveaux points d’approvisionnement d’eau dans le fleuve. Serait très coûteux à faire de façon privée. Sujet à approbation réglementaire (L.R.Q., c.Q -2)
Retenue d’eau de surface en milieux humides	Dans une approche collective du territoire, faire la reconnexion des cours d’eau et des milieux humides pour qu’en période de crue soit détournée l’eau de cours d’eau vers un milieu humide afin de créer des réservoirs utiles en période de sécheresse. Valorisation des milieux humides
Retenue d’eau de surface par barrage	Retenue d’eau de surface par barrage : aussi à échelle collective. Formation de réservoirs à même le cours d’eau pour collecter/maintenir un certain volume d’eau; l’eau pourra être décantée et être utilisée dans les systèmes d’irrigation lors des périodes plus sèches. Comprend aussi le captage des eaux de crue de surface (écrêtage de débit de cours d’eau).
Outil collectif de gestion de l’eau	Suivi des débits d’étiage (USHER) : système qui permet de contrôler le prélèvement de l’eau dans un contexte de sécheresse. Détermine des horaires de prélèvement spécifiques selon différents scénarios de débits d’étiage. L’utilisation de logiciels de simulation de modèle de culture ainsi que l’acquisition de données pour alimenter des simulations permettront de plus en plus la calibration de modèles de culture selon différentes prévisions.
Récupération des eaux pluviales	Le dimensionnement du réservoir se fait en fonction de la demande et des précipitations reçues dans la région. Cette technologie est actuellement utilisée en milieu urbain pour l’utilisation de l’eau non potable. Technologie plus applicable dans des régions avec des problèmes de sécheresse.
Puits d’injection	Envisageable dans le cas d’une nappe phréatique très basse. Injection d’eau directement dans la nappe phréatique durant des périodes propices à la recharge. Technologie applicable dans un contexte urbain, et peut être applicable dans un contexte agricole pour recharger la nappe phréatique et augmenter l’approvisionnement en eau à partir de celle-ci. Technologie qui dépend entre autres du contexte géologique et géographique.